



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

O USO DO MODELO HELE-SHAW VERTICAL
PARA ESTUDO DE AQUÍFEROS COSTEIROS

TRABALHO APRESENTADO COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

M E S T R E E M H I D R O L O G I A A P L I C A D A

AUTOR: Marcos Imério Leão

ORIENTADOR: Prof. Ceferino Alvarez Fernandez

EXAMINADORES:

Prof. Ceferino Alvarez Fernandez

Prof. Adolpho Kurt Hanke

Geólogo Abrão Hausman

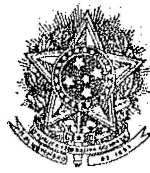
Data do exame: 14/05/80

Aprovação:

Assinatura manuscrita do Presidente da Banca, feita com uma caneta escura, sobre uma linha horizontal.

Presidente da Banca

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Av. Bento Gonçalves, 10600 — C.P. 530
90.000 PORTO ALEGRE (RS) — BRASIL



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

ATA DE DISSERTAÇÃO

Às 08:30 horas do dia 14 de maio de 1980, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, reuniu-se a Comissão Examinadora de Dissertação do candidato ao grau de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento, MARCOS IMÉRIO LEÃO, para apreciação de seu trabalho intitulado "O USO DO MODELO HELE-SHAW VERTICAL PARA ESTUDO DE AQUÍFEROS COSTEÍROS".

Abertos os trabalhos sob a presidência de Ceferino Alvarez Fernandez e presente o candidato, foi-lhe dada a palavra para uma exposição sobre as premissas, estrutura e resultados do trabalho apresentado. A seguir, foi o mesmo arguido, sucessivamente, pelos examinadores, sobre diferentes aspectos provocados pelo exame do texto e pela exposição precedente. Encerrados os trabalhos desta fase, após as respostas do candidato, reuniu-se a Comissão Examinadora, sem a presença do candidato e das demais pessoas que compareceram à fase inicial, para atribuir seu julgamento, que é transcrito a seguir:

Examinador	Conceito
- Ceferino Alvarez Fernandez	A
- Adolpho Kurt Hanke	A
- Abrão Hausman	A

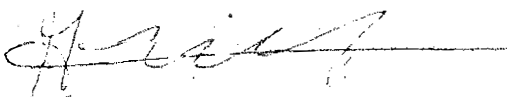
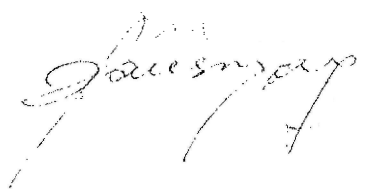
Resultou dos conceitos atribuídos o conceito final A (Excelente)

Observações:

Foi concedido o prazo de 30 dias para a apresentação do trabalho final com as devidas correções.

Ato contínuo, foi lavrada a presente ATA, que eu, Adolpho Hanke secretário da Comissão Examinadora, assino juntamente com a mesma Comissão.

Porto Alegre, 14 de maio de 1980.

- 


AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao Dr. Ceferino Alvarez Fernandez, que me orientou, possibilitando a concretização desse trabalho de dissertação.

À Direção do Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Coordenação do Curso de Pós-Graduação.

À Fundação de Amparo a Pesquisa no Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela bolsa concedida. À Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) pela colaboração prestada no fornecimento de dados. Ao Dr. Fernando Anguita, consultor da UNESCO pela colaboração prestada na fase inicial do trabalho. Aos colegas do Setor de Águas Subterrâneas, geólogos Mário Wrege e José Carlos S. Martins e ao hidrotécnico Cláudio Pacheco pelas colaborações prestadas. Ao setor de Desenho, as Bibliotecárias e ao pessoal da oficina do IPH-UFRGS. Àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que fosse possível a realização desse trabalho.

SINOPSE

Esse trabalho mostra as condições atuais de exploração dos aquíferos costeiros, a maneira de explorá-los e de protegê-los contra a intrusão de água salgada.

Tem como objetivo principal mostrar a utilidade do modelo Hele-Shaw vertical para estudar os aquíferos costeiros, dando uma contribuição para o desenvolvimento da modelação física no Brasil.

ABSTRACT

This study shows the present state of exploitation of coastal aquifers, how to exploit them and protect them from salt water intrusion.

The main purpose is to show the usefulness of the vertical Hele-Shaw model in studying coastal aquifers, thus contributing to the development of scale models in Brazil.

S U M Á R I O

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS E METODOLOGIA	4
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 - Aspectos Teóricos	6
3.2 - Proteção de Aquíferos Costeiros	13
3.2.1 - Modificação do bombeamento	15
3.2.2 - Recarga artificial	15
3.2.3 - Barreira de bombeamento	17
3.2.4 - Barreira submarina	18
3.3 - Metodologia para localização do interface	19
3.3.1 - Sondagem	19
3.3.2 - Piezômetros	20
3.3.3 - Medida dos níveis piezométricos	20
3.3.4 - Nivelamento dos pontos de medida	21
3.3.5 - Densimetria e salinidade	21
3.3.6 - Amostragens	21
3.3.7 - Geofísica	22
3.4 - Modelos para estudo de aquíferos costeiros	22
3.4.1 - Modelos analógicos e matemáticos	22
3.4.2 - Caixa de Areia	23
3.4.3 - Modelos elétricos de papel condutor e R.C. ..	23
3.4.4 - Modelos de fluidos viscosos	24
4 - MODELO HELE-SHAW VERTICAL	24
4.1 - Aspectos teóricos	25
4.2 - Escalas do modelo	29
4.2.1 - Escala de permeabilidade	30
4.2.2 - Escala de comprimento	31

4.2.3 - Escala de tempo	31
4.2.4 - Escala de vazão	32
4.2.5 - Escala de volume	33
4.3 - Fluxo de dois fluidos	34
5 - APLICAÇÃO DO MODELO HELE-SHAW VERTICAL	37
5.1 - Construção do modelo	37
5.2 - Calibração do modelo	38
5.3 - Os líquidos	42
5.4 - Escalas	44
5.4.1 - Escala de comprimento	44
5.4.2 - Escala de altura	44
5.4.3 - Escala de espaçamento	44
5.4.4 - Escala de permeabilidade	45
5.4.5 - Escala de porosidade	46
5.4.6 - Escala de tempo	46
5.4.7 - Escala de vazão	47
6 - TESTES E RESULTADOS	48
7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	60
SIMBOLOGIA	88
BIBLIOGRAFIA	90

ANEXOS

Tabela 1 - Viscosidade absoluta de soluções aquosas de glicerina	65
Gráfico nº 1 - Curva de calibração do modelo	66
Gráfico nº 2 - Viscosidade x temperatura Mobiloil SAE 30	67
Gráfico nº 3 - Viscosidade x temperatura solução de glicerina	68
Gráfico nº 4 - Influência da vazão sobre o tempo de intrusão	69
Gráfico nº 5 - Influência da vazão sobre o tempo de intrusão	70
Gráfico nº 6 - Influência da distância sobre o tem- po de intrusão	71
Gráfico nº 7 - Evolução no tempo da cunha de intru- são	72
Foto nº 1 - Vista do modelo Hele-Shaw vertical	73
Prancha nº 1 - Fotos com teste do modelo	74
Prancha nº 2 - Fotos com teste do modelo	75
Prancha nº 3 à nº 14 - Testes no modelo	76

1. INTRODUÇÃO

O estudo das inter-relações entre a água doce e a água salgada em zonas costeiras tem apresentado grande interesse.

No Brasil, particularmente, esse assunto está se revestindo de grande importância pelo fato de as maiores concentrações populacionais estarem distribuídas ao longo dos 8.500 quilômetros de costa.

Normalmente, os aquíferos costeiros entram em contato com o oceano ao longo da linha de costa ou então mar a dentro ocorrendo então, a descarga de água doce no mar.

Considera-se água salgada aquela água com teor de cloretos em torno de 19.000 ppm. Chama-se cunha de água salgada a uma massa de água salgada de grande longitude com seção em forma de cunha apoiada na base do aquífero e com o pé situado terra a dentro. Chama-se cone de água salgada a toda a protuberância vertical da massa de água salgada produzida por bombeamento ou drenagens locais numa zona onde haja água doce sobre a água salgada. Chama-se intrusão salina ao movimento temporário ou permanente da cunha salgada em direção ao continente (CUSTODIO & LLAMAS, 1976) (Figura 1).

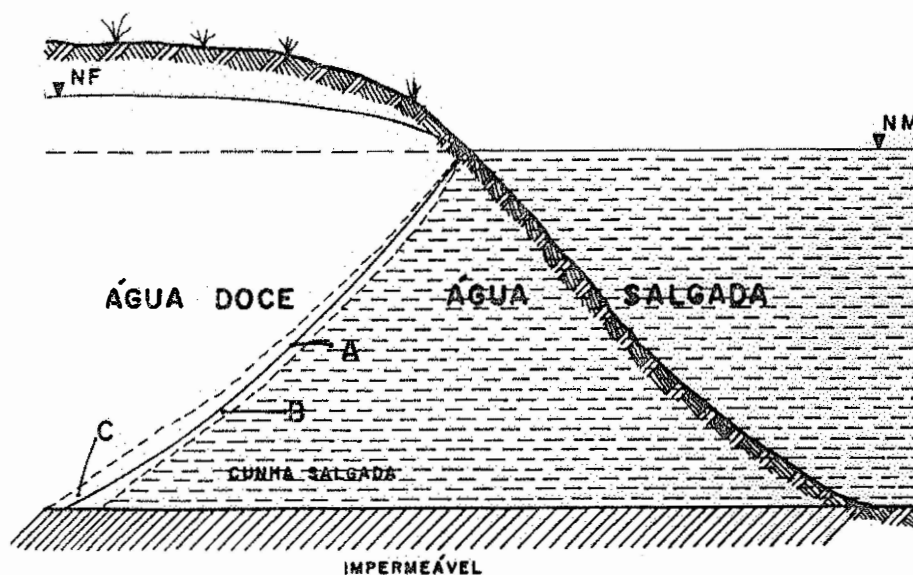
O limite entre dois fluidos imiscíveis, como a água e o azeite, é definido claramente através de uma linha de separação denominada interface.

Normalmente essa interface tem uma posição e uma orientação intimamente relacionada com a velocidade e a direção do movimento, com o potencial hidráulico e também com a densidade

dos dois fluidos.

Mas pode acontecer de os dois fluidos serem miscíveis como por exemplo, a água doce e a água salgada, não formando uma linha de interface definida, mas sim, uma zona de mescla de água doce e salgada chamada de Zona de Transição (Figura 2).

Essa zona de transição é uma zona dinâmica que se move em consequência de vários fatores tais como, diferenças de densidade, variações do nível piezométrico em ambos os líquidos ocasionados por aumento ou diminuição das marés oceânicas, bombeamento em aquíferos costeiros, precipitações pluviométricas, etc.



A - INTERFACE ÁGUA DOCE X ÁGUA SALGADA

B - ZONA DE MESCLA (ZONA DE TRANSIÇÃO)

C - VÉRTICE OU PÉ

NF- NÍVEL FREÁTICO

NM- NÍVEL DO MAR

FIGURA 1

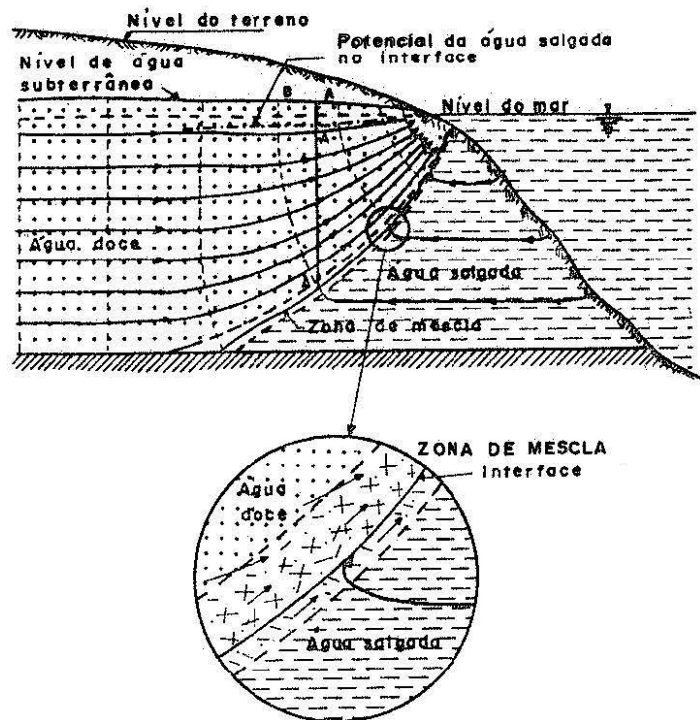


FIGURA 2

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O uso de modelos físicos na Hidrologia vem sendo largamente difundido. Eles possibilitam em particular uma ótima visualização do que acontece na natureza.

Este trabalho tem como objetivos principais:

- mostrar a situação atual das condições de exploração dos aquíferos costeiros;
- . a maneira mais adequada de explorar estes aquíferos sem que haja problemas de intrusão salina;
- . e a utilidade do modelo Hele-Shaw vertical para o estudo de intrusão salina em aquíferos costeiros.

A metodologia empregada foi simples e objetiva. Consistiu, basicamente, na busca de bibliografia existente sobre esse assunto, compilando-se uma boa revisão bibliográfica onde foram abordados aspectos da teoria sobre a hidrodinâmica dos aquíferos costeiros, bem como os principais casos de intrusão salina ocorridos no mundo e as técnicas de proteção desses aquíferos.

Pesquisou-se a existência de estudos feitos com modelos Hele-Shaw verticais no Brasil e no Mundo. No Brasil existem estes modelos (F. MARTINS, 1973) mas nenhum que abordasse o problema da intrusão salina em aquíferos costeiros.

Partiu-se então, para a construção, o que resultou em um modelo simples sem muitas sofisticções.

Após, escolheram-se os líquidos a serem utilizados, tendo-se optado por uma solução aquosa de glicerina e pelo óleo lubrificante Mobiloil SAE-30. Determinou-se a seguir as esca

las do modelo e do protótipo.

Efetuaram-se os testes de calibração do modelo e após foram realizadas várias experiências. Os resultados das experiências foram analisados e extrapolados para o protótipo onde foram tiradas as conclusões finais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Aspectos Teóricos

Os estudos das inter-relações entre água doce e salgada foram desenvolvidos por vários pesquisadores como Baden Ghyben (1889), Herzberg (1901), Hubbert (1940) e Lusczynski.

Ghyben e Herzberg ao efetuarem esse estudo admitiram duas hipóteses básicas:

- a - Não existe fluxo de água salgada e o fluxo de água doce é perfeitamente horizontal;
- b - O interface é um plano, não existindo zona de mescla.

Pelas hipóteses admitidas podemos dizer, (Figura 3) que em qualquer ponto A do interface deverá ocorrer um equilíbrio entre a pressão de água doce e a de água salgada.

$$(h_d + Z) \gamma_d = Z \gamma_s$$

sendo:

h_d = cota sobre o nível do mar da água doce na vertical do ponto P.

Z = profundidade abaixo do nível do mar do ponto P.

γ_d = peso específico da água doce $\approx 1.000 \text{ g/cm}^3$

γ_s = peso específico da água salgada $\approx 1.025 \text{ g/cm}^3$

$$Z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h_d$$

se $\beta = \gamma_s - \gamma_d$

sendo $\frac{1}{\beta} = 40$

temos:

$$Z = 40 h_d$$

Esta fórmula mostra que o interface se situa a uma profundidade abaixo do nível do mar igual a 40 vezes a cota absoluta de água doce naquele ponto.

Então, a penetração máxima da cunha de água salgada vem limitada pelo fundo impermeável do aquífero (Ponto B da figura 3), e esta condicionada por:

$$h_d = b.\beta$$

sendo:

b = espessura do aquífero saturado abaixo do nível do mar.

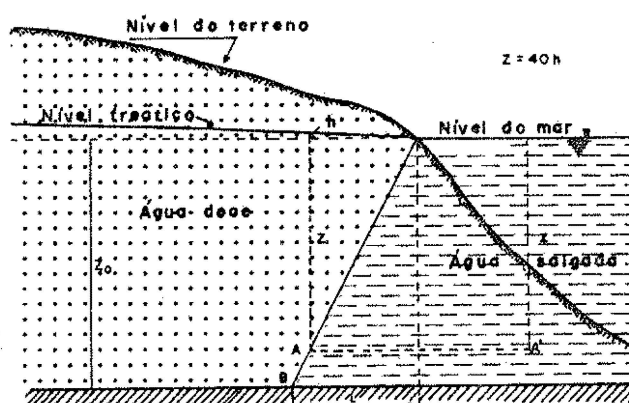


FIGURA 3

Hubbert (1940) realizou este estudo do interface mas admitiu que na zona de contato entre a água doce e água salgada existe uma zona de mescla, ou seja, há uma mistura das duas e, onde se supõem um transporte de água doce e salobra do aquífero.

para o mar. Este movimento limita a espessura da zona de mescla, tanto mais fina quanto maior é o fluxo de água do aquífero para o mar e menores são os movimentos do interface. Se não existisse esse fluxo, a largura da zona de mescla cresceria com o tempo, indefinidamente.

Se a transição entre a zona de água salgada e doce é muito rápida não se comete um grande erro em supor um interface de espessura nula.

Supondo que a espessura da zona de mescla seja muito pequena e, que em determinado local se tenha dois piezômetros, um aberto acima do interface, na água doce, e outro cheio de água salgada e aberto abaixo do interface (Figura 4).

No primeiro se observa um nível de água doce sobre o nível do mar (h_d), e no segundo um nível de água salgada (h_s) geralmente negativo.

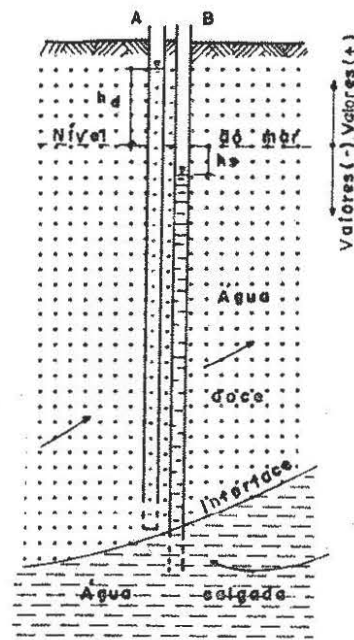


FIGURA 4

A profundidade (Z) do interface será dada pelo equilíbrio entre as duas colunas de líquidos.

$$(Z + h_d) \gamma_d = (Z + h_s) \gamma_s$$

de onde

$$Z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h_d - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} \cdot h_s$$

$$Z = \frac{1}{\beta} \cdot h_d - (1 + \frac{1}{\beta}) \cdot h_s$$

Como h_s é em geral negativo, a profundidade Z , assim calculada, é maior que a que se calcularia de acordo com a Lei de Ghyben-Herzberg.

Luszczynski realizou estudos sobre este assunto, mas supôs a existência de um aquífero com água doce na parte superior e salgada na inferior e entre ambas uma zona de mescla determinada pelo intervalo de altura Z_1 e Z_2 , (figura 5) podemos escrever:

$$(\gamma_a - \gamma_d) Z_1 = \gamma_d \cdot h_a - \gamma_p \cdot h_p - (\gamma_p - \gamma_a) Z$$

que é uma relação geral aplicável a um meio poroso com um fluido de densidade variável.

Esta fórmula permite comparar as diferenças entre ter em conta ou prescindir da zona de mescla.

a) Sendo $Z_1 = Z_2$, ou seja, não há zona de mescla, é $\gamma_a = \gamma_s$ e

$$h_p = h_s :$$

$$Z_1 = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} - \gamma_s h_s + \gamma_d h_a$$

que é igual a fórmula de Hubbert se fizermos $h_a = h_d$, que equivale a supor um fluxo perfeitamente horizontal.

b) Se supormos que a água salgada é estacionária, com nível médio do mar $h_s = 0$

$$Z_1 = \frac{1}{\gamma_s - \gamma_d} \gamma_d h_a = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d$$

que é a fórmula de Ghyben-Herzberg.

Se a única restrição é que o fluxo é horizontal, $h_z = h_d$ e a fórmula de Lusczynski torna-se simplificada:

$$Z_1 = \frac{1}{\gamma_a - \gamma_d} [-\gamma_p h_p - Z(\gamma_p - \gamma_a) + \gamma_d h_d]$$

que é a fórmula que melhor se adapta pois inclui a zona de mistura.

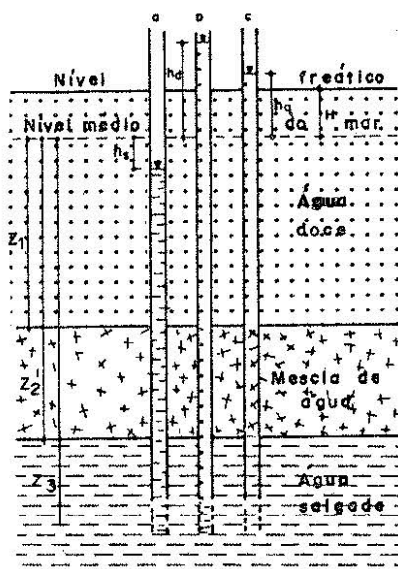


FIGURA 5

- a) Nível de água pontual, h_p
- b) Nível de água doce, h_d
- c) Nível de água ambiental ou local, h_a

Convém lembrar que a fórmula de Ghyben-Herzberg supõe que a água salgada tenha o nível médio do mar e se toma como zero e por ela é preciso conhecer esse nível médio do mar. Como as outras fórmulas determinam o nível da água salgada, a refe-
rência altimétrica pode ser qualquer.

É de real importância para a exploração e gestão de aquíferos costeiros a determinação da profundidade onde se encontra a água salgada.

A profundidade do interface pode ser calculada pela fórmula de Ghyben-Herzberg, onde é admitido fluxo perfeitamente horizontal, água salgada estacionária e total ausência de zona de mescla.

A profundidade do interface é menor que a real na ausên-
cia da zona de mescla, mas é muito maior do que o início da zo-
na de mescla quando essa é espessa.

Mas existe um inconveniente, que é a determinação do nível médio do mar, pois a mesma ocasiona resultados absurdos em zonas de mescla grandes.

Pode ser calculada através da fórmula de Hubbert que nos dá uma posição média da zona de mescla na ausência de fluxo vertical importante. Não é necessário conhecer o nível médio do mar.

Teoricamente é possível conseguir uma melhora com a fórmula de Lusczynski utilizando dois piezômetros que permitam determinar γ_d , γ_p , h_d e h_p .

3.2 - Proteção de Aquíferos Costeiros

São numerosos os casos de intrusões de água salgada em aquíferos causadas por um movimento inverso do fluxo de água subterrânea devido a bombeamentos ou drenagens excessivas em aquíferos conectados com o mar ou com estuários.

Segundo Todd (1973), as principais intrusões salinas que se tem conhecimento nos EUA foram:

- Na parte oeste de Long Island (New York), ocorreu uma intrusão devido ao uso desordenado dos recursos subterrâneos e um decréscimo na recarga devido a drenagens e sistemas de esgotos. Em algumas áreas com intrusões maiores foram abandonadas, ou seja, suspendeu-se o bombeamento e passou-se a usar a água do serviço de abastecimento da cidade de New York.
- Próximo a Miami ocorreu uma intrusão em rochas calcáreas permeáveis do aquífero de Biscayne que foi causado por uma inversão no gradiente do aquífero não confinado em contato com o mar. A construção de canais de drenagens para permitir a urbanização de áreas baixas foi a causa da intrusão. Muitos poços foram abandonados. Fizeram-se tentativas para controlar a intrusão de barragens de controle de salinidade (Kohout, 1960).
- Na Califórnia, devido ao grande desenvolvimento da exploração de águas subterrâneas, ocorreram várias intrusões salinas em muitos aquíferos costeiros. O controle foi feito através da colocação de poços de injeção de água doce. Também utilizou-se uma barreira experimental de extração com aproximadamente 700 metros de comprimento que foi operada com sucesso na Baía de Oxnard no Condado de Ventura (Todd, 1973).

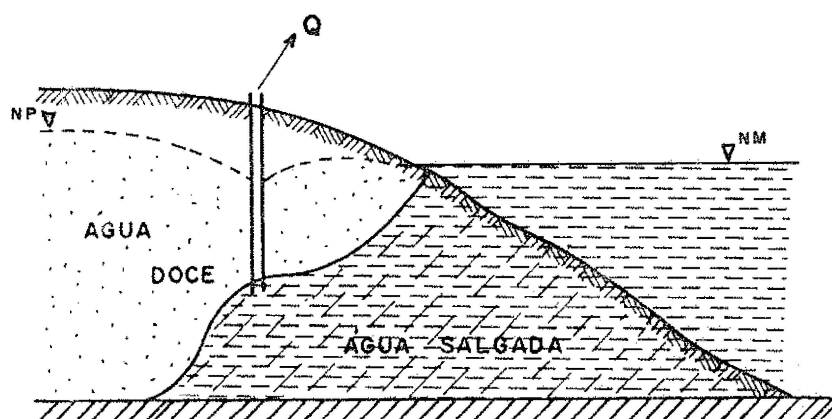
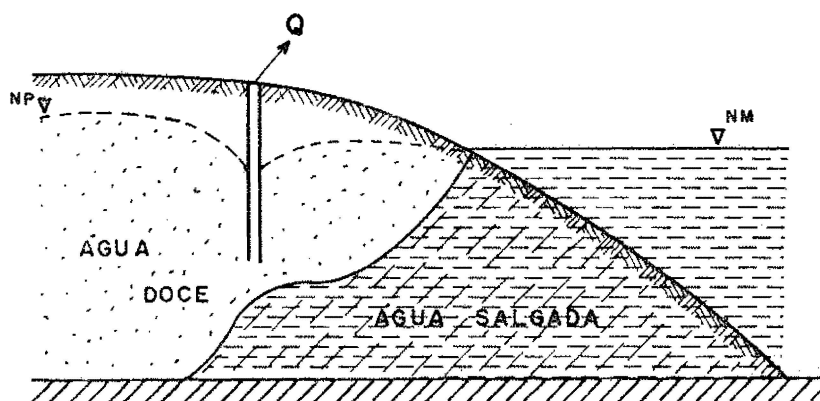
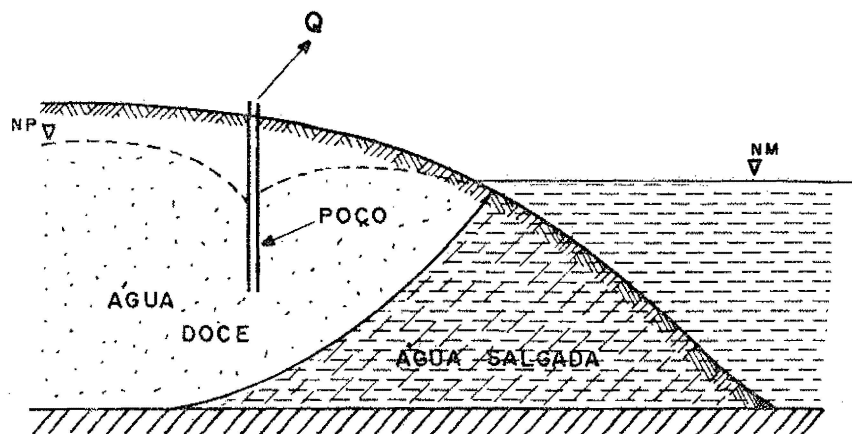


FIGURA 6

Quando se deseja proteger um aquífero costeiro de uma possível intrusão marinha pode-se usar vários métodos. Os métodos mais importantes são:

3.2.1 - Modificação do bombeamento

Ao observar-se que a água extraída de um aquífero, começa a tornar-se salgada, se fizer uma redução na quantidade bombeada ou reorganizar-se os pontos de bombeamento poderá ser eliminada a intrusão marinha.

O bombeamento em demasia de um aquífero costeiro poderá ocasionar a subida do interface provocando a formação de um cone de água salgada. Este cone poderá estacionar ou atingir o poço que está sendo bombeado. (Figura 6).

Em qualquer um dos casos não se pode aproveitar toda a água doce do aquífero pois um volume considerável da mesma se perde no mar. Esta perda é que faz com que o aquífero não se torne salgado.

3.2.2 - Recarga Artificial

Este sistema em alguns casos torna-se inviável devido aos altos custos, pois o método consiste em injetar água de boa qualidade no aquífero a ser extraída juntamente com a do aquífero (Figura 7).

A injeção de água no aquífero controla a intrusão marinha pois forma uma crista de pressão de água doce adjacente e paralela a costa, e sobre o nível do mar.

Na figura 7 podemos ver que (Alberto Benitez, 1972):

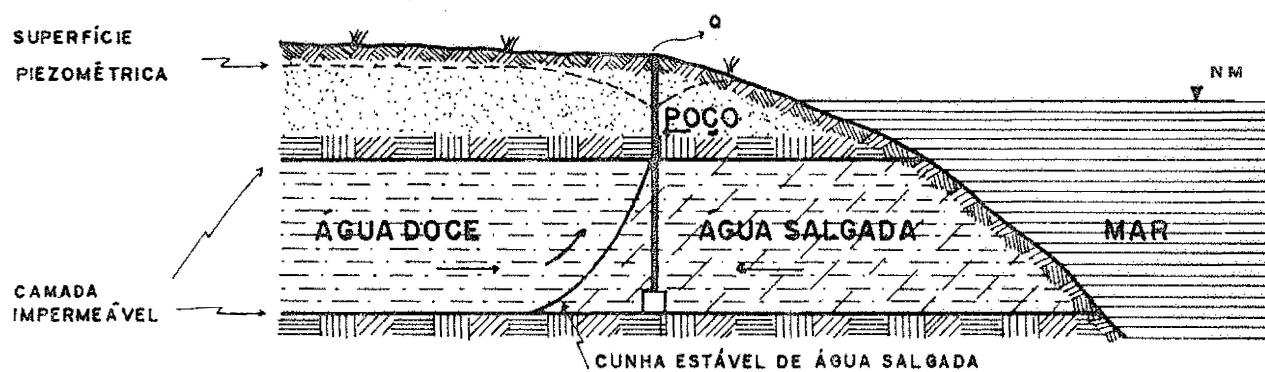
$$Q = q_1 + q_2$$

$$Q' > Q$$

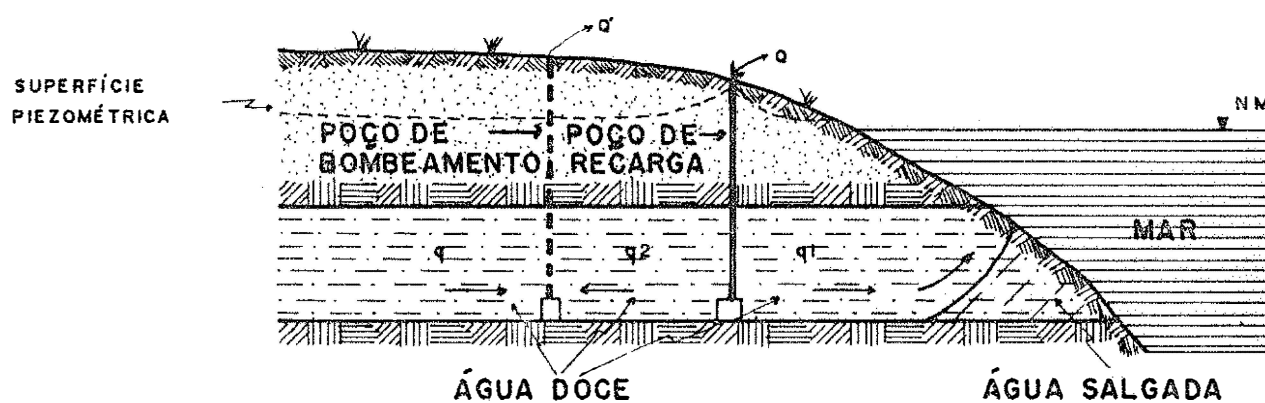
$$Q' = q + q_2$$

Normalmente se constroi uma série de poços ao longo da costa.

Este método foi usado para controle de intrusão em Manhattan Beach, Califórnia em 1953 (Todd, 1959).



a) BOMBEAMENTO.



b) RECARGA.

FIGURA 7

3.2.3 - Barreira de Bombeamento

Este método consiste basicamente em uma linha de poços ao longo da costa que sofrendo um bombeamento formam uma depressão ou barreira no nível piezométrico da água subterrânea (Figura 8).

Este método, não é econômico e, reduz notavelmente o volume de água utilizada do aquífero além de perder-se uma boa quantidade de água doce que é extraída mesclada com água salgada para retornar ao mar. Este método foi usado na parte sul do delta de Besòs, Barcelona (Custódio, 1965).

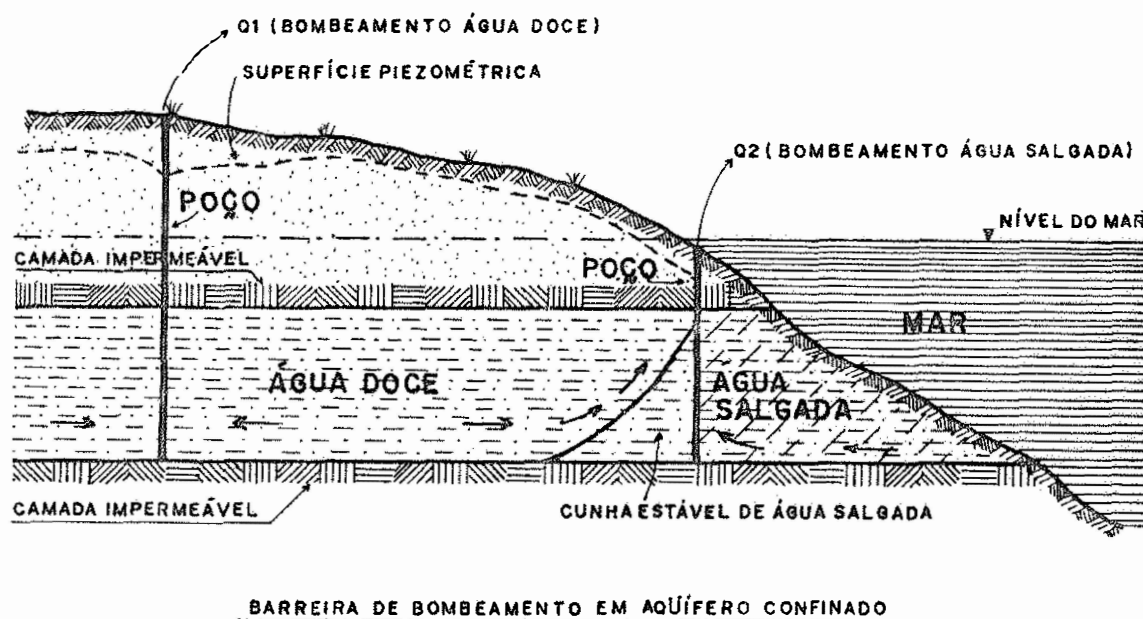
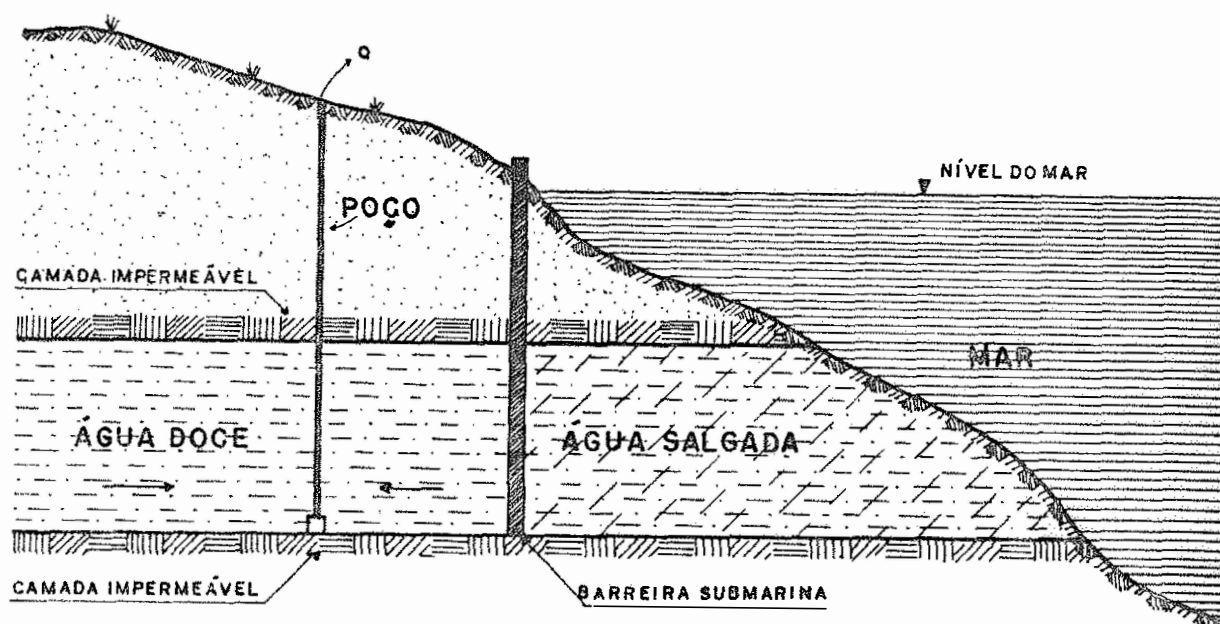


FIGURA 8

3.2.4 - Barreira Submarina

Este método de controle de intrusão marinha consiste na construção de uma barreira submarina com a finalidade de reduzir a permeabilidade do terreno de maneira a impedir a entrada de água salgada no aquífero (Figura 9).

Nos aquíferos superficiais essas barreiras podem ser construídas de estacas-prancha, asfalto, concreto ou argila cimentada.



BARREIRA SUBMARINA AQUIFERO CONFINADO

FIGURA 9

Para evitar a construção de trincheiras pois podem custar muito, pode-se recorrer a injeção de produtos impermeabilizantes no terreno através de uma linha de furos. Entre os produtos impermeabilizantes destacam-se: emulsão de asfalto, injeção de cimento, lama de bentonita, sílica-gel, ou acrilato de cálcio.

A vantagem deste método está no fato de que ele não necessita gastos muito grandes de conservação.

Em áreas sísmicas deve-se ter um cuidado especial pois os movimentos de terra, podem ocasionar rupturas provocando a intrusão de água salgada.

Com este método pode-se utilizar o aquífero em toda a sua potencialidade.

3.3 - Metodologia para Localização do Interface

A localização do interface necessita do emprego de métodos clássicos em hidrogeologia e de outros mais particulares. Os primeiros passos para definir a sua localização são:

3.3.1 - Sondagem

As sondagens são indispensáveis nesse tipo de estudo. Elas permitem verificar se o aquífero é livre ou confinado e conhecer a composição litológica do mesmo.

Não é necessário conhecer a permeabilidade do aquífero salgado se é admitido que não há circulação do mesmo.

3.3.2 - Piezômetros

Deve-se prever a possibilidade de se coletar amostras nos piezômetros, devendo os mesmos possuírem um diâmetro suficiente para tal.

É necessário conhecer a qualidade da água contida no piezômetro se quisermos conhecer o significado dos níveis que são medidos.

Deve-se ter dois piezômetros, um com entrada de água salgada e outro com entrada de água doce.

O primeiro irá nos fornecer o nível médio do mar e o outro o nível piezométrico da água doce.

3.3.3 - Medida dos níveis piezométricos

As medidas dos níveis nos piezômetros levando em conta certas precauções podem fornecer informações importantes.

Deverão ser tomados certos cuidados, pois um erro na avaliação da diferença de nível entre a superfície piezométrica e o nível médio do mar é grosseiramente multiplicado por 40 (Ghyben-Herzberg) indo interferir na avaliação da posição do interface.

Para uma avaliação mais precisa deve-se evitar o uso de sonda elétrica.

A frequência de medidas é função da rapidez de variação dos níveis. Se o aquífero é sensível as flutuações da maré, torna-se indispensável a instalação de aparelhos registradores em alguns piezômetros.

Estas medidas serão completadas com as medidas do nível

do mar e suas variações no tempo. Torna-se necessário a instalação de um marégrafo.

3.3.4 - Nivelamento dos pontos de medida

Todos os pontos de medidas devem ser nivelados em relação a uma base comum para permitir a comparação entre eles de medidas feitas em pontos diferentes.

Não são admitidos erros de nivelamento no estudo da cunha salgada.

3.3.5 - Densimetria e salinidade

São as densidades que intervêm na lei de Ghyben-Herzberg, então são os seus valores que convém medir nas amostras.

As densidades a serem testadas estão compreendidas, normalmente, entre 0,995 (densidade de água destilada à 32°C) e 1,032 (densidade da água salgada à 0°C).

3.3.6 - Amostragens

A amostragem em piezômetros deve ser feita com o máximo cuidado.

Existe o perigo da amostragem não ser representativa da realidade. Normalmente se faz três amostragens: uma na superfície, uma no meio e outra na parte ranhurada do piezômetro.

Poderá acontecer três situações:

- 1 - As três amostras são compostas de água salgada;
- 2 - As tres amostras são compostas de água doce;
- 3 - Uma ou duas amostras são compostas de água salgada.

No caso 1, se realiza um bombeamento para renovar a água que se encontra na parte não ranhurada do piezômetro. Neste caso irá se estabelecer um nível que será o nível médio do mar.

No caso 2 o nível medido será o da superfície piezométrica. Este caso não tem valor algum para o estudo, a não ser que hajam variações importantes do nível.

No caso 3, deve-se multiplicar as amostragens para determinar perfeitamente a posição do interface e da zona de transição. Pode-se também multiplicar o número de piezômetros de maneira a poder controlar a evolução dos níveis.

3.3.7 - Geofísica

A geofísica pode fornecer um conhecimento da posição do interface, a condição é que se deve conhecer previamente a maneira de aferir convencionalmente as medidas físicas.

É praticamente impossível de distinguir uma camada de aluvião que contém água salgada de uma camada de argila impermeável, logo de distinguir o interface de uma camada argilosa.

3.4 - Modelos para Estudo de Aquíferos Costeiros

3.4.1 - Modelos Analógicos e Matemáticos

Os modelos analógicos e matemáticos são de grande utilidade nos estudos de Hidráulica e Hidrologia subterrânea. São menos empregados nos estudos das relações água doce-água salgada em aquíferos costeiros. Isto se deve a dificuldade em simular

o comportamento de dois líquidos diferentes e miscíveis e também a simulação do interface.

O desenvolvimento matemático conduz a equação não lineares de expressões muito complicadas e de manejo muito difíceis para o computador. No modelo matemático o problema do interface pode ser aplicado desde que se resolva a equação de fluxo para cada fluido utilizado e por meio dessas soluções determinar as diversas posições do interface para cada intervalo de tempo adotado.

3.4.2 - Caixa de Areia

A caixa de areia, por exemplo, pode simular problemas em duas ou três dimensões, pode simular regime permanente e transitório podendo até representar as heterogeneidades e anisotropias do aquífero. A desvantagem está na representação de aquíferos livres pois a espessura de franja capilar fica muito grande e também é difícil reproduzir o coeficiente de armazenamento. É possível representar o interface água doce-água salgada.

3.4.3 - Modelos Elétricos de Papel Condutor e R.C.

Os modelos elétricos de papel condutor somente podem representar problemas de duas dimensões, regime permanente, sendo muito difícil tratar com problemas de heterogeneidade e anisotropia,

Os modelos elétricos de resistência e capacitores (R-C) são capazes de simularem problemas de duas ou três dimensões, com movimento permanente e transitório, também reproduzir a heterogeneidade e a anisotropia e o coeficiente de armazenamento.

Nestes modelos não é possível a representação do interface água doce-água salgada.

3.4.4 - Modelos de Fluidos Viscosos

Os modelos de fluidos viscosos, mais conhecidos por modelos Hele-Shaw, podem simular problemas de duas dimensões, quer sejam modelos horizontais ou verticais. Tanto os modelos horizontais como os verticais podem simular o movimento permanente e transitório e a heterogeneidade e anisotropia. A vantagem do modelo Hele-Shaw vertical está no fato dele poder representar o interface água doce-água salgada e também a superfície livre em um aquífero confinado.

4. MODELO HELE-SHAW VERTICAL

Existe uma analogia entre o movimento da água subterrânea no meio poroso e o movimento de um fluido viscoso entre duas placas paralelas de espaçamento pequeno.

Estes modelos foram estudados pela primeira vez pelo professor Hele-Shaw da Universidade de Liverpool, em 1897.

Estes modelos são classificados em dois tipos tendo em vista a posição das placas: horizontais e verticais. Os modelos de placas verticais tem apresentado um grande interesse pois apresenta uma série de vantagens sobre os modelos horizontais. São mais fáceis de serem construídos, permitem a simulação de fluidos distintos simultaneamente. Os modelos de placas horizontais permitem a simulação e avaliação dos efeitos do

fluxo radial provocado pelo bombeamento em um poço ou mais, tanto em aquíferos livres como aquíferos confinados.

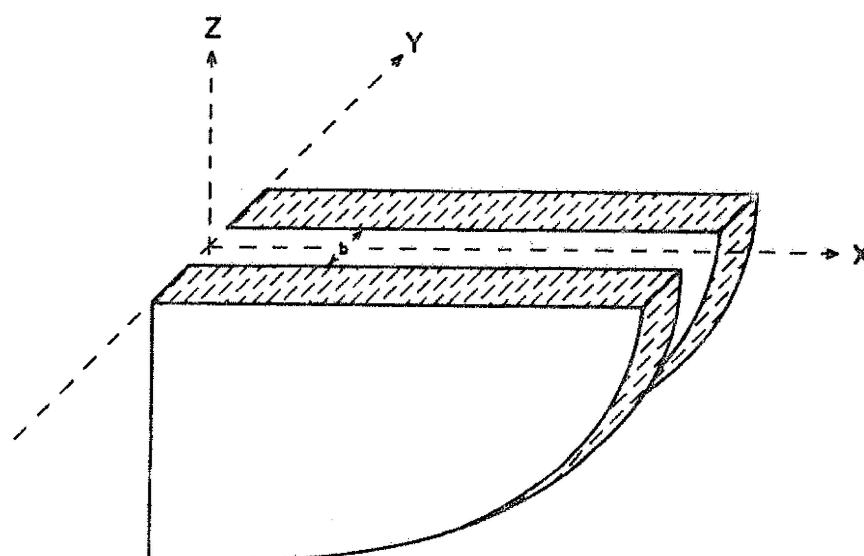
Sob temperatura constante o movimento de um fluido viscoso entre duas placas paralelas separadas por uma distância capilar está definido pelo gradiente de potencial, ou seja, o regime obedece a equação de Laplace e é possível a analogia com o fluxo estacionário da água subterrânea, tratado em duas dimensões.

Um problema importante que pode ser investigado pelo modelo é o do fluxo simultâneo de 2 líquidos. O problema de intrusão da água salgada em aquíferos costeiros é um exemplo destes problemas.

4.1 - Aspectos Teóricos

A analogia neste tipo de modelo, está ligada as equações de Navier-Stokes para o escoamento entre placas paralelas e também a equação de Darcy para o escoamento em meio poroso.

As equações de Navier-Stokes para este tipo de escoamento são as seguintes:



$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial y} + u \frac{\partial w}{\partial x} = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$g = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

Nas equações acima u e w são as componentes da velocidade nas direções x e z , respectivamente, e y a componente na direção y , que é igual a zero, por ser perpendicular as placas.

As forças de viscosidade que atuam neste tipo de escoamento são tão grandes que as forças de inércia situadas no primeiro membro das equações acima podem ser desprezadas.

Sabe-se que as variações de u e w e das suas derivadas na direção y são muito maiores que as variações de u e w no plano x - z , logo as derivadas de segunda ordem dos componentes de velocidade nas direções x e z podem ser desprezadas se comparadas com:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \text{ e } \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

Efetuada as comparações, as equações 1, 2 e 3 podem ser escritas da seguinte maneira:

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$0 = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (5)$$

$$\rho \cdot g = - \frac{\partial p}{\partial y} \quad (6)$$

Podemos ver que as equações diferenciais ordinárias à derivadas parciais de u e w em função de y são as de número 4 e 5.

Sendo b o espaçamento entre as placas de acrílico verificamos que para $y = \pm b/2$, $u = w = 0$. Integrando-se as equações 4 e 5, tem-se

$$u = \frac{1}{2\mu} \left(y^2 - \frac{b^2}{4} \right) \frac{\partial}{\partial x} (p + \rho \cdot g \cdot y) \quad (7)$$

$$w = \frac{1}{2\mu} \left(y - \frac{b}{4} \right) \frac{\partial}{\partial z} (p + \rho \cdot g \cdot y) \quad (8)$$

Integrando-se, agora, as equações acima pode-se obter as velocidades médias nas direções x e z , entre as placas separadas por uma distância b .

$$\bar{u} = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{+b/2} u dy \quad (9)$$

$$\bar{u} = - \frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(z + \frac{\rho}{\gamma} \right)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{b} \int_{-b/2}^{+b/2} w dy$$

$$\bar{w} = - \frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(z + \frac{\rho}{\gamma} \right) \quad (10)$$

Fazendo-se

$$\frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu} = K_m$$

e

$$z + \frac{\rho}{\gamma} = h_m$$

Tem-se então:

$$\bar{u} = K_m \frac{\partial h_m}{\partial x} \quad (11)$$

$$\bar{w} = K_m \frac{\partial h_m}{\partial z} \quad (12)$$

Nota-se que a analogia existente entre as equações acima e a lei de Darcy, onde:

$$V = -K \frac{dh}{dl}$$

sendo a analogia dada por:

- V é análogo a \bar{u} e \bar{w} no modelo
- K é análogo a $\frac{b^2}{12} \cdot \frac{\gamma}{\mu}$ no modelo
- $\frac{dh}{dl}$ é análogo a $\frac{\partial h_m}{\partial x}$ e $\frac{\partial h_m}{\partial z}$ no modelo

4.2 - Escalas do Modelo

JACOB BEAR (1960) descreveu as escalas do modelo partindo de que:

O fluxo bidimensional da água subterrânea com uma superfície freática em aquífero não isotrópico é descrito por:

$$K_{xp} \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial x_p^2} + K_{zp} \frac{\partial^2 \phi_p}{\partial z_p^2} = S_{op} \frac{\partial \phi_p}{\partial t_p} \quad (1)$$

Para um ponto no aquífero,

$$K_{xp} \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial x_p} \right)^2 + K_{zp} \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial z_p} \right)^2 - \frac{\partial \phi_p}{\partial z_p} = n_p \frac{\partial \phi_p}{\partial t_p} \quad (2)$$

Se a zona de capilaridade é negligenciada e não há movimento através da superfície livre.

Estas duas equações podem ser escritas para o fluxo através do espaço entre duas placas paralelas verticais de um modelo de fluido viscoso. A diferença está no fato de que o modelo é isotrópico, ou seja,

$$K_m = \frac{1}{12} g \frac{b^2}{\nu}$$

então

$$K_m \left(\frac{\partial^2 \phi_m}{\partial x_m^2} + \frac{\partial^2 \phi_m}{\partial z_m^2} \right) = S_{om} \frac{\partial \phi_m}{\partial t_m} \quad (3)$$

$$K_m \frac{\partial \phi_m^2}{\partial x_m} + \frac{\partial \phi_m^2}{\partial z_m} - \frac{\partial \phi_m}{\partial z_m} = n_m \frac{\partial \phi_m}{\partial t_m} \quad (4)$$

Por substituição

$$K_{x_p} = \frac{K_{xm}}{K_{xr}} ; K_{z_p} = \frac{K_{zm}}{K_{zr}} ; X_p = \frac{X_m}{X_r} \quad (5)$$

$$Z_p = \frac{Z_m}{Z_r} , \phi_p = \frac{\phi_m}{\phi_r} , n_p = \frac{n_m}{n_r}$$

$$t_p = \frac{t_m}{t_r} ; S_{op} = \frac{S_{om}}{S_{or}}$$

na equação 2 comparando o resultado com a equação 4, as relações são obtidas de acordo com as leis de similitude:

$$\frac{x_r^2}{K_{xr} \phi_r^2} = \frac{z_r^2}{K_{zr} \phi_r^2} = \frac{Z_r}{K_{zr} \phi_r^2} = \frac{t_r}{n_r \phi_r} = \alpha \quad (6)$$

α pode ser um número, da definição de α resulta $\phi_r Z_r$; consequentemente as escalas do modelo são dadas por:

$$\frac{X_r^2}{K_{xr}} = \frac{Z_r^2}{K_{zr}} \left(\frac{X_r}{Z_r} \right)^2 = \frac{K_{xr}}{K_{zr}} = \frac{K_{zp}}{K_{xp}} \quad (7)$$

e

$$t_r = \frac{n_r Z_r}{K_r} \quad \text{ou} \quad t_r = \frac{n_r X_r^2}{K_{xr} Z_r} \quad (8)$$

4.2.1 - Escala de Permeabilidade

A permeabilidade do modelo é obtida a partir da fórmula:

$$K_m = \frac{b_m^2}{12} \cdot \frac{g}{v}$$

4.2.2 - Escala de Comprimento

Quando $K_{xp} = K_{zp}$ as escalas horizontal e vertical se não obrigatoriamente as mesmas.

Normalmente um aquífero tem um comprimento maior que a profundidade.

É possível desenhar um modelo com esta distorção de escalas. Nestes casos é necessário admitir que a condutividade hidráulica horizontal é muito maior que a vertical, e a distorção de escalas é determinada de acordo com esta situação. O error introduzido neste caso é muito pequeno.

4.2.3 - Escala de Tempo

A situação das escalas de tempo será governada pelo intervalo de tempo entre duas leituras sucessivas de descarga, nível, etc. A equação 8 de uma forma mais detalhada fica:

$$t_m = \frac{n_m}{n_p} \frac{X_r^2}{Z_r} \frac{K_{xp}}{K_{xm}} t_p = \frac{12}{g} \frac{K_{xp}}{n_p} \frac{X_r^2}{Z_r} \frac{v}{b^2} t_p \quad (9)$$

Isto indica que uma escala de tempo aprovada pode ser obtida para uma escala de comprimento dada pela manipulação da largura do espaço entre as placas, b e da viscosidade do líquido, v.

4.2.4 - Escala de Vazão

A escala de vazão é obtida pela lei de Darcy. Partindo do fluxo do protótipo

$$Q_{xp} = - K_{xp} \cdot b_p \cdot Z_p \cdot \frac{\partial \phi_p}{\partial x_p}$$

e o fluxo do modelo

$$Q_{xm} = - K_{xm} \cdot b_m \cdot Z_m \cdot \frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$$

resulta que:

$$Q_{xr} = \frac{K_{xr} \cdot b_r \cdot Z_r^2}{x_r} \quad (10)$$

similarmente,

$$Q_{zr} = K_{zr} \cdot b_r \cdot X_r$$

e resulta que

$$Q_{xr} = Q_{zr} = Q_r$$

4.2.5 - Escala de Volume

$$V_r = Q_r t_r = n_r x_r z_r b_r$$

Para o caso de aquíferos não homogêneos, isto é, um aquífero onde haja muitas camadas com possibilidades diferentes, uma simulação através do modelo é possível pela variação na largura do espaço entre as placas. Isto pode ser obtido pela introdução de pedaços de plástico ou outro material com a forma geométrica da camada no espaço, criando uma redução de espaço livre para o fluxo de líquido viscoso.

No caso de uma camada impermeável, $b_m = 0$, consequentemente o espaço inteiro é preenchido.

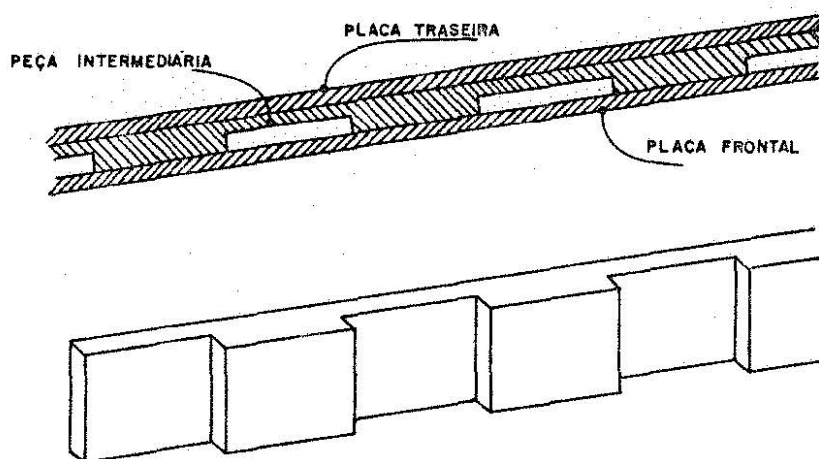


FIGURA 10

Quando existem camadas de pequena permeabilidade o espaço entre as placas b_m é muito pequeno e pode causar problemas para construir e operar o modelo. Estes casos ocorrem quando camadas semi-impermeáveis relativamente finas, em que o fluxo é maior na direção vertical, estão presentes.

Uma solução prática para este caso é usar peças como a apresentada na figura 10.

4.3 - Fluxo de Dois Fluidos

Um problema importante que pode ser investigado através do modelo Hele-Shaw vertical, é o da intrusão de água salgada em aquíferos costeiros.

Assumindo que a condutividade hidráulica do modelo é a mesma para as áreas ocupadas pelos dois líquidos diferentes, e usando o fato de que a condutividade hidráulica do solo é inversamente proporcional a viscosidade da água, então:

$$K_{mf} = \frac{1}{12} g \frac{b_m^2}{v_{mf}} ; K_{pfx} = C \frac{1}{v_{pf}}$$

$$K_{ms} = \frac{1}{12} g \frac{b_m^2}{v_{ms}} ; K_{psx} = C \frac{1}{v_{ps}}$$

e

$$K_{rf} = K_{rs}$$

então

$$\left(\frac{v_m}{v_p}\right)_f = \left(\frac{v_m}{v_p}\right)_s$$

A pressão em qualquer ponto do corpo do interface é a mesma em ambos os lados do interface.

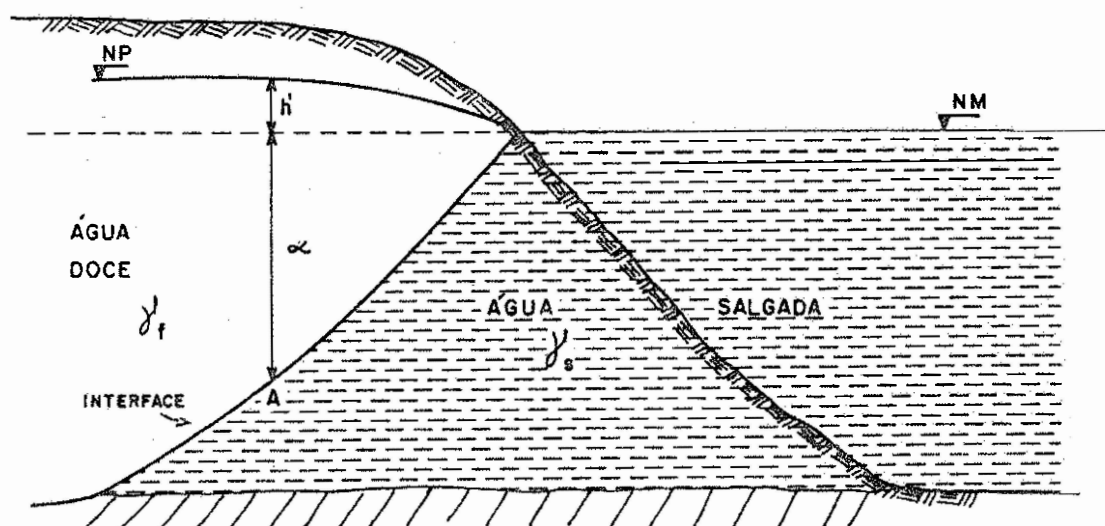


FIGURA 11

A figura 11, mostra um aquífero costeiro freático, no ponto A a equação para o protótipo é:

$$\alpha_p \gamma_{sp} = (\alpha_p + h'_p) \gamma_{fp}$$

ou

$$\alpha_p \delta_p = h'_p$$

onde:
$$\delta = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f}$$

similarmente, para o modelo

$$\alpha_m \delta_m = h'_m$$

e então

$$\alpha_r \delta_r = h'_r$$

$$\alpha_r = h'_r = Z_r$$

disto resulta que a escolha dos dois líquidos será governada^a pelas condições em que:

$$\alpha_r = 1$$

e:

$$\left(\frac{\gamma_f - \gamma_s}{\gamma_f} \right)_m = \left(\frac{\gamma_f - \gamma_s}{\gamma_f} \right)_p$$

subíndice f = água doce

subíndice s = água salgada

5. APLICAÇÃO DO MODELO HELE-SHAW VERTICAL

5.1 - Construção do modelo

O modelo foi construído nas oficinas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, e encontra-se montado no Laboratório de Águas Subterrâneas (Foto nº 1).

Utilizaram-se duas placas transparentes de "Plexy - glass" de 13 mm de espessura, 1,80 m de comprimento e 0,50 m de altura.

Escolheu-se as placas com 13 mm de espessura para evitar o problema da flexibilidade das mesmas causada pela pressão dos líquidos que irão escoar entre elas. Esta flexibilidade poderia causar uma mudança no espaçamento entre as placas alterando, conseqüentemente, a permeabilidade do modelo.

Foram feitos uma série de furos numa das placas onde estão acoplados os piezômetros. Estes furos servem também como poços para simular o bombeamento. Construiu-se também, uma série de reservatórios de nível constante que irão servir para a introdução dos dois líquidos no modelo.

O resultado final da construção foi um modelo simples que poderá futuramente ser modificado com o incremento de algumas sofisticacões que facilitem o seu manuseio.

O modelo está montado sobre um suporte de ferro muito pesado, tornando-se difícil o seu deslocamento para outros locais.

5.2 - Calibração do Modelo

A solução matemática da equação da superfície livre é a parábola de Dupuit, que é determinada pelas coordenadas dos pontos inicial e final.

Com a finalidade de verificar se o modelo apresenta entre as placas uma espessura constante (b_m) aplica-se o teste da parábola de Dupuit.

$$q = K \cdot A \cdot j$$

$$q_m = K_m \cdot A_m \cdot j$$

$$A_m = b_m \cdot h$$

$$j = \frac{dh}{dx}$$

$$q_m = b_m \cdot h \cdot K_m \cdot \frac{dh}{dx}$$

mas:

$$K_m = \frac{1}{12} \cdot b_m^2 \cdot \frac{g}{v} \quad (1)$$

$$-\frac{q}{b_m - K_m} = \lambda$$

$$\lambda = h \frac{dh}{dx}$$

$$\lambda dx = h dh$$

integrando:

$$\int \lambda dx = \int h dh$$

isto é:

$$\lambda x = \frac{h^2}{2} + c^{te}$$

$$2 \lambda x + c^{te} = h^2$$

$$\text{para } x = 0 \quad h = h_0$$

$$\text{para } x = L \quad h = h_f$$

$$\text{de onde } c^{te} = h_0^2$$

$$2 \lambda L + h_0^2 = h_f^2$$

o que nos dá

$$\lambda = \frac{h_0^2 - h_f^2}{2 \cdot L}$$

A equação geral se escreve:

$$h^2 = 2 \lambda x + h_0^2$$

Derivando:

$$2 h h' = 2 \lambda$$

$$h' = \frac{\lambda}{h}$$

$$h' = \frac{\lambda}{\sqrt{2 \lambda x + h_0^2}}$$

ou:

$$h' = \frac{q / b_m K_m}{\sqrt{\frac{-2q}{b_m} x + h_o^2}}$$

$$h' = \frac{-q}{b_m K_m h_o}$$

$$-\lambda = \frac{h_o^2 - h_f^2}{2 L}$$

$$q_m = \frac{b_m^3 \cdot K_m \cdot (h_o^2 - h_f^2)}{2 L} \quad (2)$$

Pondo 1 em 2

$$q_m = \frac{b_m^3 \cdot g \cdot (h_o^2 - h_f^2)}{24 L \nu}$$

A calibração do modelo tem como finalidade a verificação se o espaçamento entre as placas é uniforme.

Deixou-se escoar entre as placas o óleo lubrificante (Mobiloil) e determinou-se uma altura inicial (h_o) e uma altura final (h_f), isto após ter-se verificado se a vazão estava constante.

Calculou-se as diferentes alturas piezométricas ao longo do percurso através da fórmula.

$$h^2 = h_o^2 - (h_o^2 - h_f^2) \frac{x}{L}$$

onde:

h = altura do nível piezométrico no ponto considerado

h_o = altura piezométrica inicial

h_f = altura piezométrica final

x = distância ao longo do modelo

L = comprimento do modelo.

Tem-se

$$h_o = 27,2 \text{ cm}$$

$$h_f = 25,0 \text{ cm}$$

$$L = 140 \text{ cm}$$

$$q_m = 0,06 \text{ cm}^3/\text{s}$$

de onde

$$h^2 = (27,2)^2 - (27,2^2 - 25,0^2) \frac{x}{140}$$

os resultados obtidos estão no quadro abaixo: (Valores em cm)

x_{cm}	0	20	40	60	80	100	120	140
h_t^{cm}	27,2	26,9	26,59	26,28	25,97	25,65	25,33	25,00
h_m^{cm}	27,2	26,90	26,60	26,30	26,00	25,60	25,30	25,00

Plotam-se os valores de h_t e h_m em um gráfico $h = f(x)$ e observa-se o comportamento da curva obtida na experiência prá

tica (h_m) em relação a curva teórica (h_t). Se as duas coincidirem, isto mostra uma perfeita uniformidade entre as placas.

Pelo quadro acima podemos notar que há uma pequena irregularidade entre as placas, na sua parte inicial. (Gráfico nº 1)

5.3 - Os Líquidos

Na escolha dos líquidos optou-se pela glicerina e pelo óleo lubrificante Mobiloil SAE-30.

Mediu-se a densidade e a viscosidade absoluta do óleo. A densidade foi medida pelo método do picnômetro e a viscosidade com o auxílio do Viscosímetro "HOPPLER", onde foram medidos os tempos de queda das esferas para diferentes temperaturas. Feito isso, obteve-se um gráfico viscosidade x temperatura. (Gráfico nº 2).

Para a glicerina adotou-se o mesmo processo para a determinação da densidade e da viscosidade, obtendo-se um gráfico viscosidade x temperatura (gráfico nº 3).

Os 2 líquidos usados no modelo, devem ter a mesma viscosidade e densidades diferentes.

Tendo em vista que o óleo não é passível de uma mistura, procurou-se na tabela de "Viscosidade Absoluta de Soluções Aquosas de Glicérina", do Handbook of Chemistry and Physics, uma solução que tivesse a mesma viscosidade absoluta que o óleo numa dada temperatura (Tabela 1).

A densidade do óleo determinada pelo método do picnômetro foi de $0,877 \text{ g/cm}^3$ e a viscosidade de 20°C foi de $271,1 \text{ centiPoises (cP)}$.

Na tabela consultada encontrou-se que a 20°C uma solução de glicerina com 91% em peso tem uma viscosidade absoluta de 278,4 cP (ver tabela nº 1).

Preparada a solução de glicerina com 91% em peso de glicerina, mediu-se a viscosidade e encontrou-se 271,6 centi - Poise à 20°C e a densidade medida foi de 1,238 g/cm³.

A diferença entre as viscosidades dos dois fluidos é menor que 1%, sendo portanto, aceitável.

Uma vantagem apresentada pelos dois líquidos são as cores. A solução de glicerina é incolor e o óleo possui uma cor amarelada, o que proporciona uma boa diferenciação entre os mesmos, eliminando assim o uso de corantes.

No modelo, a solução de glicerina irá representar a água salgada e o óleo irá representar a água doce.

5.4 - Escalas

Temos que definir a correspondência mais adequada entre os parâmetros e variáveis do modelo e seus homólogos do protótipo.

$$\text{Escala} = \frac{\text{magnitude do modelo}_{(m)}}{\text{magnitude homóloga do protótipo}_{(p)}}$$

O modelo Hele-Shaw vertical tem as seguintes dimensões: 1,50 m de comprimento e 0,50 m de altura.

As escalas adotadas nas experiências realizadas estão abaixo relacionadas:

5.4.1 - Escala de comprimento

$$\bar{X}_r = \frac{X_m}{X_p}$$

$$\bar{X}_r = 0,001 \text{ ou } 1:1000$$

5.4.2 - Escala de altura

$$\bar{Z}_r = \frac{Z_m}{Z_p}$$

$$\bar{Z} = 0,02 \text{ ou } 1:50$$

5.4.3 - Escala de Espaçamento

O espaço entre as placas do modelo foi calculado pela fórmula:

$$b_m^3 = \frac{q_m \cdot 24 \cdot L \cdot v}{g (h_o^2 - h_f^2)}$$

tendo resultado

$$b_m = 0,0018 \text{ m}$$

O espaçamento adotado para o protótipo foi:

$$b_p = 5,0 \text{ m}$$

$$\bar{b}_r = \frac{b_m}{b_p}$$

$$\bar{b}_r = 0,0004$$

5.4.4 - Escala de permeabilidade

A permeabilidade do modelo é obtida pela fórmula:

$$K_m = \frac{b_m^2 \cdot g}{12 \cdot v}$$

sendo

$$g = 10 \text{ m/s}$$

$$v = 0,000312 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$b_m = 0,0018 \text{ m}$$

$$K_m = 0,0096 \text{ m/s}$$

A permeabilidade do protótipo foi arbitrada em:

$$K_p = 7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\bar{K}_r = \frac{K_m}{K_p}$$

$$\bar{K} = 1,37$$

5.4.5 - Escala de Porosidade

A porosidade do modelo é:

$$n_m = 1$$

A porosidade do protótipo foi considerada igual a:

$$n_p = 0,30$$

$$n_r = \frac{n_m}{n_p}$$

$$n_r = 3,33$$

5.4.6 - Escala de Tempo

Utilizando a equação 9 (ver 4.2.3) obtem-se a escala de tempo

$$t_m = \frac{12}{g} \frac{K_p}{n_p} \frac{X_r^2}{Z_r} \frac{v}{b_m^2} t_p$$

$$t_m = 0,00025 t_p$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

5.4.7 - Escala de Vazão

A escala de vazão foi obtida a partir da equação 10 (ver 4.2.4).

Sendo:

$$K_r = 1,37$$

$$b_r = 0,00038$$

$$Z_r^2 = 0,0001$$

$$X_r = 0,001$$

$$Q_r = \frac{K_r b_r Z_r^2}{X_r}$$

$$Q_r = 0,0002$$

Como

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p}$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

6 - TESTES E RESULTADOS

Realizaram-se 12 testes com o modelo Hele-Shaw.

A temperatura ambiente esteve em torno de 20°C com uma variação de $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Esta variação provocou erros nos diferentes resultados em particular no que se refere a densidades e viscosidades dos líquidos indo afetar a condutividade hidráulica do modelo. No obstante os resultados obtidos como poderá se ver mais adiante, apesar dos erros, as experiências realizadas dão uma noção perfeita do fenômeno da intrusão salina e da influência dos diferentes fatores.

A construção de um modelo mais sofisticado possibilitaria a introdução de parâmetros, tais como a precipitação.

Não foi levado em conta a contribuição exercida pela precipitação pluviométrica em nenhuma das experiências realizadas. Este fenômeno, caso fosse utilizado, alteraria os resultados das experiências.

Um fato observado foi a total ausência da zona de mecla. Havia um interface perfeitamente definido.

Para as experiências foram admitidos uma série de condições inalteráveis, que são:

- a condutividade hidráulica do modelo
(K_m) igual a $9,6 \times 10^{-3}$ m/s;
- a condutividade hidráulica do protótipo
(K_p) igual a 7×10^{-3} m/s;
- a largura entre as placas (b_m) igual a 0,0018 m;
- a largura do protótipo (b_p) igual a 5,0 m.

Todas as experiências finalizaram quando um dos ca
sos abaixo ocorreu:

- intrusão salina no poço que estava sendo bombeado,
ou;
- quando estabilizava o avanço da cunha salgada e não
ocorria intrusão no poço.

Os resultados das experiências estão nas pranchas
que estão no final do trabalho.

Os significados dos parâmetros que compõem estas pranch
as estão explicados na figura nº 12.

TESTE Nº 1 (ver prancha nº 3)

Para o teste nº 1 as seguintes condições foram admiti
das, no modelo:

- distância do poço a costa (d_m) = 10,0 cm
- espessura do aquífero (H_m) = 22,0 cm
- profundidade do poço (Z) = 16,5 cm
- gradiente ($\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$) igual a 0,06

Para o protótipo, aplicando-se as escalas, fica:

- distância do poço a costa (d_p) = 100 metros
- espessura do aquífero (H_p) = 11,0 metros
- profundidade do poço (Z_p) = 8,25 metros
- o gradiente ($\frac{\partial \phi_p}{\partial x_p}$) = 0,003

A temperatura média ambiente era igual a 20°C.

Os resultados do teste estão plotados na prancha nº 3
onde indicam-se os valores obtidos no modelo e seus homólogos no

protótipo.

A vazão de bombeamento no modelo foi de $Q_m = 0,14 \text{ cm}^3/\text{s}$. Este bombeamento durou 15 minutos (= 900 segundos) por que no final deste período ocorreu intrusão salina no poço.

Esta vazão $Q_m = 0,14 \text{ cm}^3/\text{s}$ ($= 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$) corresponde a $Q_p = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ no protótipo.

O tempo total de bombeamento $t_m = 15 \text{ minutos}$ ($= 900 \text{ s}$) tem como homólogo no protótipo $t_p = 1000 \text{ horas}$ que corresponde a aproximadamente 41 dias.

Isto nos mostra que seriam necessários em torno de 41 dias de bombeamento ininterrupto para que houvesse uma intrusão salina no poço bombeado.

O desenvolvimento da cunha salgada nos diferentes tempos pode ser observada nas fotos que compõe a prancha nº 1. Nesta prancha pode-se ver a variação do nível piezométrico no decorrer da experiência e a configuração tomada pela cunha salgada no momento da intrusão no poço.

TESTE Nº 2 (ver prancha nº 4)

As condições iniciais para este teste foram, para o modelo:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	$Q_m (\text{cm}^3/\text{s})$	T_{oC}	d_m (cm)
26,0	20,5	0,04	0,06	20°	10,0

As mesmas condições transportadas para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (m)
13,0	10,25	0,002	1,08	100,0

Os resultados obtidos no teste estão plotados na prancha nº 4, onde pode-se ver os valores obtidos no modelo e seus homólogos no protótipo.

Após 35 minutos (= 2100 s) de bombeamento no modelo, que corresponde a 2333 horas de bombeamento no protótipo, todos os níveis piezométricos estabilizaram sem ocorrer intrusão salina no poço.

O desenvolvimento da cunha salgada e a variação dos níveis piezométricos no modelo podem ser observados na sequência de fotos que compõem a prancha nº 2.

TESTE Nº 3 (ver prancha nº 5)

As condições iniciais para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	$T_{^{\circ}C}$	d_m (cm)
28,5	23,0	0,2	0,8	21 ^o	50,0

Transportando-se os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ / h)	d_P (m)
14,25	11,5	0,01	14,4	500,0

Os resultados obtidos no teste estão plotados na prancha nº 5.

Neste teste, após 9 minutos (= 540 segundos) de bombeamento no poço do modelo que está situado a 10,0 cm da linha de costa ocorreu uma intrusão de água salgada no mesmo. Este tempo de bombeamento de 9 minutos corresponde no protótipo a 600 horas ou 25 dias.

Então seria necessário, no protótipo, um bombeamento de 14,4 m³/h durante aproximadamente 25 dias ininterruptos para que houvesse uma intrusão de água salgada num poço situado a 11,5 m de profundidade em um aquífero que tivesse 14,25 m de espessura.

TESTE Nº 4 (ver prancha nº 6)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
29,5	24,0	0,036	0,11	21°	50,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (m)
14,75	12,0	0,002	1,98	500,0

Este teste durou 54 minutos (= 3240 s) tempo este que corresponde a 3600 horas ou 150 dias no protótipo.

Neste teste não houve uma estabilização dos níveis, mas devido ao longo tempo de bombeamento e o desenvolvimento lento da cunha salgada resolveu-se parar após 54 minutos de bombeamento.

TESTE Nº 5 (ver prancha nº 7)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
29,0	23,5	0,04	0,25	21°	50,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (cm ³ /h)	d_P (m)
14,5	11,75	0,002	4,5	500,0

Após 18 minutos (= 1080 segundos) de bombeamento no modelo, ocorreu uma intrusão de água salgada no poço. Este tempo de bombeamento do modelo corresponde a 1200 horas ou 50 dias de bombeamento.

Pode-se dizer que, no protótipo, seria necessário que

se bombeasse 4,5 m³/h, ininterruptamente, durante aproximadamente 50 dias para que houvesse uma intrusão salina no poço.

TESTE Nº 6 (ver prancha nº 8)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
27,0	21,5	0,04	0,05	21°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (m)
13,5	10,75	0,002	0,9	100,0

Os resultados estão plotados na prancha nº 8 tanto para o modelo como para o protótipo.

Este teste foi feito durante 60 minutos (=3600 segundos), tendo estabilizado os níveis após este período sem que houvesse intrusão salina no poço.

Este tempo de bombeamento no modelo corresponde a 4000 horas ou aproximadamente 166 dias no protótipo.

TESTE Nº 7 (ver prancha nº 9)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
27,0	21,5	0,03	0,35	21°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (m)
13,5	10,75	0,0015	6,30	100,0

Este teste teve a duração de 7 minutos (= 420 segundos), após o qual ocorreu uma intrusão salina no poço. Este tempo de bombeamento no modelo corresponde a 466 horas ou aproximadamente 19 dias no protótipo.

TESTE Nº 8 (ver prancha nº 10)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
27,0	21,5	0,04	0,14	21°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (cm ³ /h)	d_P (m)
13,5	10,75	0,002	2,52	100,0

Este teste teve a duração de 14 minutos (= 840 segundos) no modelo, ao fim dos quais ocorreu uma intrusão salgada no poço. Este tempo do modelo corresponde a 933 horas ou a aproximadamente 39 dias no protótipo.

TESTE Nº 9 (ver prancha nº 11)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm /s)	$T_{°C}$	d_m (cm)
21,0	15,5	0,06	0,05	20°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (.m)
10,5	7,75	0,003	0,9	100,0

Neste teste foi feito bombeamento durante 90 minutos (= 5400 segundos) ao fim dos quais ocorreu a estabilização dos níveis sem que houvesse intrusão salgada no poço. Este tempo de bombeamento do modelo corresponde a 6000 horas ou 250 dias de bombeamento no protótipo.

TESTE Nº 10 (ver prancha nº 12)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
20,0	14,5	0,08	0,20	20°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (m)
10,0	7,25	0,004	3,60	100,0

Neste teste foi efetuado o bombeamento no poço durante 15 minutos (= 900 segundos), ao fim dos quais ocorreu uma intrusão de água salgada. Este tempo de bombeamento do modelo corresponde a 1000 horas ou aproximadamente 42 dias no protótipo.

TESTE Nº 11 (ver prancha nº 13)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
21,0	15,5	0,06	0,11	22°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_m (m)
10,5	7,75	0,003	1,98	100,0

Neste teste foi efetuado o bombeamento no poço durante 32 minutos (= 1920 segundos) ao fim dos quais ocorreu uma intrusão de água salgada. Este tempo de bombeamento do modelo corresponde a 2133 horas ou aproximadamente 89 dias no protótipo.

TESTE Nº 12 (ver prancha nº 14)

As condições iniciais do teste para o modelo são:

H_m (cm)	Z_m (cm)	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x_m}$	Q_m (cm ³ /s)	T_{oC}	d_m (cm)
21,0	15,5	0,06	0,06	22°	10,0

Transportando os dados acima para o protótipo tem-se:

H_P (m)	Z_P (m)	$\frac{\partial \phi_P}{\partial x_P}$	Q_P (m ³ /h)	d_P (m)
10,5	7,75	0,003	1,08	100,0

Neste teste foi efetuado o bombeamento no poço durante 35 minutos (= 2100 segundos) ao fim dos quais houve uma estabilização dos níveis piezométricos sem que ocorresse intrusão de água saltada no poço. Este tempo de bombeamento do modelo corresponde a 2333 horas ou a aproximadamente 97 dias no protótipo.

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A princípio, este trabalho era para ser aplicado para o aquífero de São José do Norte (RS) mas, devido a falta do dado mais importante que era a profundidade real do interface água doce-água salgada, optou-se por um estudo teórico.

Neste aquífero teórico, manteve-se a profundidade aproximada da real. Considerou-se o aquífero homogêneo e isotrópico, o que na realidade não ocorre.

Então, uma relação dos resultados aqui obtidos com a realidade é altamente aleatória.

Selecionou-se 12 testes que foram feitos em diferentes condições. Em alguns testes procurou-se manter os níveis piezométricos e variou-se a vazão de bombeamento (testes nº 3,4,5, 6,7,8,9,10,11 e 12). Em outros, procurou-se manter os níveis piezométricos e variou-se a vazão de bombeamento e a distância do poço bombeado (testes nº 3,4,5,6,7, e 8).

Dos testes nº 1 e nº 2 foram feitas duas pranchas fotográficas onde podem ser visualizadas duas situações que ocorrem durante o trabalho, ou seja, a intrusão de água salgada no poço ou a estabilização da cunha salgada.

Um detalhe importante durante a observação das pranchas de testes é que quando o nível P_2 , ou seja, altura de água salgada no poço, atinge o valor 5,5 centímetros para o modelo (2,75 metros para o protótipo), ocorre intrusão de água salgada no poço.

Os resultados dos testes estão plotados nas pranchas

de nº 3 até nº 14, onde estão indicados os valores do modelo e seus homólogos no protótipo.

Elaborou-se gráficos que deram uma melhor visualização dos fenômenos ocorridos durante os testes e que possibilitaram tirar uma série de conclusões.

Os gráficos nº 4 e 5 mostram a influência exercida pela vazão sobre o tempo de intrusão da água salgada para diferentes distâncias de bombeamento.

Pode-se observar no gráfico nº 4 que, se fosse efetuado no poço situado a 100 metros da costa um bombeamento com vazão igual a $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$, levaria cerca de 520 horas ou aproximadamente 22 dias para que houvesse intrusão de água salgada no poço. Enquanto que, com esta mesma vazão num poço situado a 500 metros da costa (gráfico nº 5), seriam necessárias 940 horas ou cerca de 40 dias de bombeamento para que a intrusão ocorresse.

Agora, se esta vazão foi reduzida para $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, no poço situado a 100 metros da costa, levará cerca de 3800 horas de bombeamento ininterrupto ou 158 dias aproximadamente para estabilizar os níveis piezométricos sem que haja intrusão de água salgada, enquanto que, no poço situado a 500 metros este tempo será muitas vezes maior.

Pode-se dizer que a vazão de $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (gráfico nº 4) é muito grande para este tipo de aquífero, levando-se em conta as condições, ou seja, espessura não muito grande do aquífero, condutividade hidráulica, gradiente muito baixo e a distância do poço ao mar muito pequena.

Pela observação do gráfico nº 6, pode-se ver que para uma vazão de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ em um poço situado a 100 metros da costa

a intrusão de água salgada ocorrerá em aproximadamente 600 horas ou cerca de 25 dias. Para esta mesma vazão de $4 \text{ m}^3/\text{h}$, em um poço situado a 500 metros da costa, a intrusão de água salgada ocorrerá em aproximadamente 1300 horas ou cerca de 54 dias.

Este bombeamento, nos dois casos, é ininterrupto. Se associarmos com a realidade, veremos que o bombeamento contínuo durante 25 ou 54 dias praticamente não ocorre.

Lembre-se aqui, também, que o fenômeno precipitação pluviométrica não foi computado.

A vazão de $4 \text{ m}^3/\text{h}$ para um poço somente, num aquífero como o de São José do Norte é impraticável, visto que a extração real está em torno de $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ por poço, considerando-se a extração simultânea de uma bateria de 20 poços. Este valor de $2,0 \text{ m}^3/\text{h}$ é dado levando-se em conta os dados do ano de 1978, no qual a média anual de bombeamento foi $43,8 \text{ m}^3/\text{h}$, conforme dados obtidos da Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN.

No gráfico nº 7 traçou-se as curvas de comprimento da cunha salgada x tempo de intrusão, isto para os testes nº 2,8,10 e 12, de onde pode-se tirar as conclusões abaixo:

- comparando-se o teste nº 2 com o teste nº 8 vê-se que, a espessura do aquífero é praticamente a mesma nos dois casos. A diferença está na vazão de bombeamento;
- Observa-se que o avanço da cunha salgada nas primeiras 1000 horas de bombeamento é rápido, podendo haver intrusão no poço (teste nº 8) ou, diminuir a velocidade de avanço até estabilizar (teste nº 2);
- no teste nº 12 observa-se que a curva de avanço da cunha salga

da conserva o comportamento semelhante a do teste nº 2, somente que de uma maneira mais suave. Varia o comprimento das duas cunhas, isto em função das vazões e também das temperaturas que são diferentes e que vem a alterar a viscosidade dos dois líquidos;

- no teste nº 10 pode-se observar que a tendência da cunha salgada, após haver intrusão no poço, é estabilizar, ou seja, diminuir a velocidade de avanço e o comprimento.

Concluindo, pode-se afirmar que a maior dificuldade encontrada foi na escolha dos dois líquidos que satisfizessem as condições para uso no modelo. A condição $\alpha_r = 1$ que governa a escolha dos dois fluidos não pode ser alcançada.

Devido ao fato acima mencionado, a aplicação da fórmula Ghyben-Herzberg para o protótipo ficou comprometida pois os valores calculados são maiores que os transformados a partir das escalas.

Mas, este fato não tira a importância do trabalho, pois para um aquífero teórico como o que aqui foi estudado, os resultados nos mostraram que o modelo está respondendo muito bem ao que dele se exige.

Algumas recomendações se fazem necessárias possibilitando a realização de futuros trabalhos neste modelo Hele-Shaw vertical, mais precisamente visando o estudo do aquífero de São José do Norte:

- são necessárias as perfurações de dois poços com profundidades a serem determinadas, que possibilitarão a determinação da profundidade real do interface água doce-água salgada, bem como

- a sua configuração;
- determinar-se as variações de densidade da água do canal que margeia a área de captação, em diferentes épocas do ano.

Para a operação do modelo Hele-Shaw vertical, recomenda-se que o mesmo seja operado em uma sala com temperatura constante pois, este é um parâmetro de grande influência nos resultados obtidos.

Com o acréscimo de algumas sofisticações no modelo, poder-se-á introduzir parâmetros, tais como a precipitação pluviométrica possibilitando a sua aplicação para casos reais.

Afora os fatos acima citados, pode-se afirmar que o trabalho ora feito atingiu os propósitos, mostrando de maneira simples e objetiva a grande importância atual e futura do uso do modelo Hele-Shaw vertical na solução dos problemas de intrusão de água salgada em aquíferos costeiros.

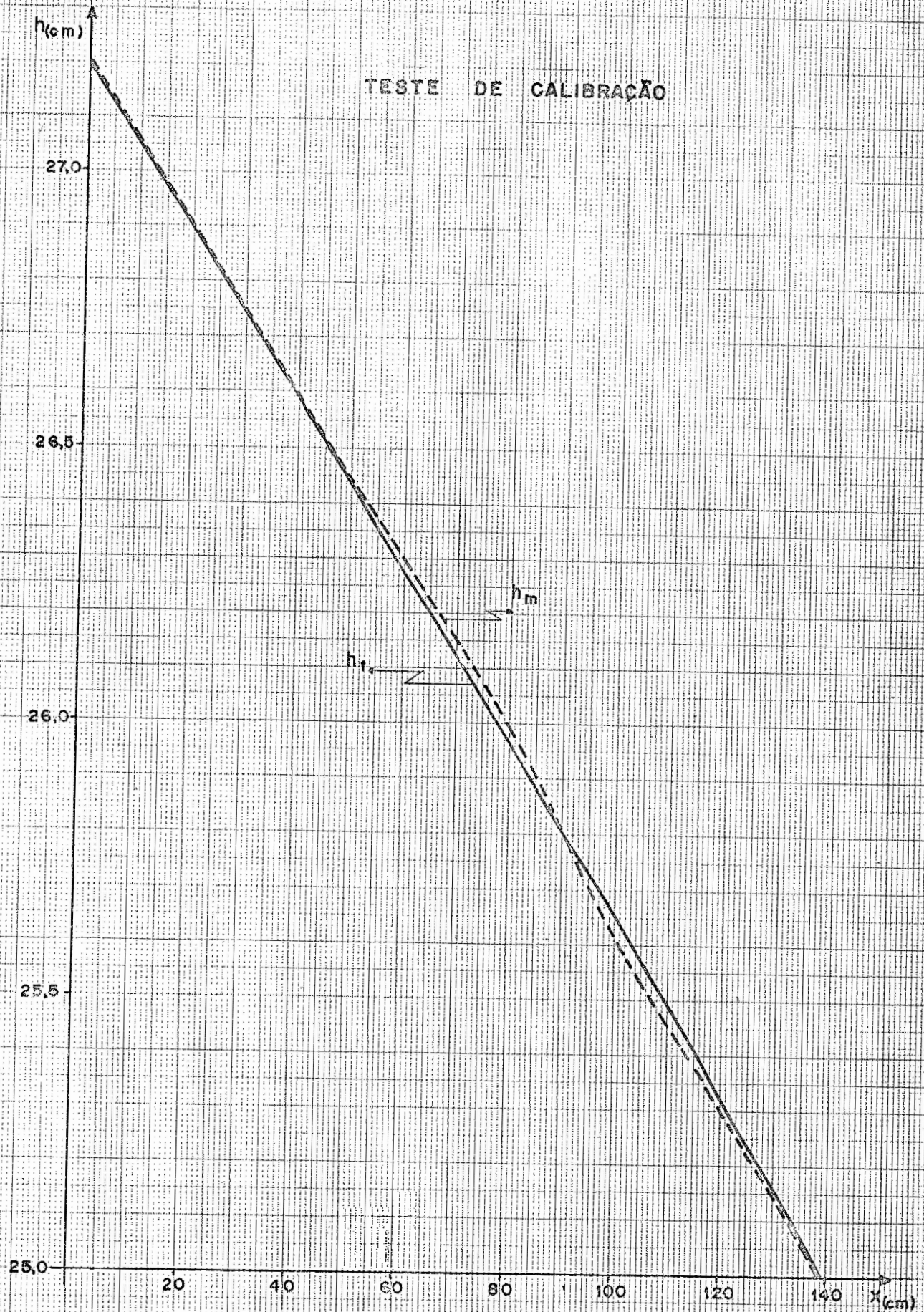
VISCOSIDADE ABSOLUTA DE SOLUÇÕES AQUOSAS DE GLICERINA

Peso Especifico 25°/25°C	Porcentagem de glicerina por peso	Viscosidade Absoluta em Centipoises		
		20°C	25°C	30°C
1.23585	90,0	234,6	163,6	115,3
1.23580	91,0	278,4	189,3	134,4
1,24115	92,0	328,4	221,8	156,5
1,24380	93,0	378,7	262,9	182 8
1,24645	94,0	457,7	308,7	212,0

(Parte da tabela copiada do " Handbook of Chemistry and Physics"
30^a Ed. (1948) p. 1742, (Chemical Rubber Publishing Co, Cleveland
O.)

Tabela - 1 -

TESTE DE CALIBRAÇÃO



$h_0 = 27.2$ cm

$L = 140$ cm

$h_f = 25.0$ cm

$\gamma_m = 0.06$ cm²/s

$\nu = 3.12$ cm²/s (Mobilol SAE-30)

Gráfico nº 1

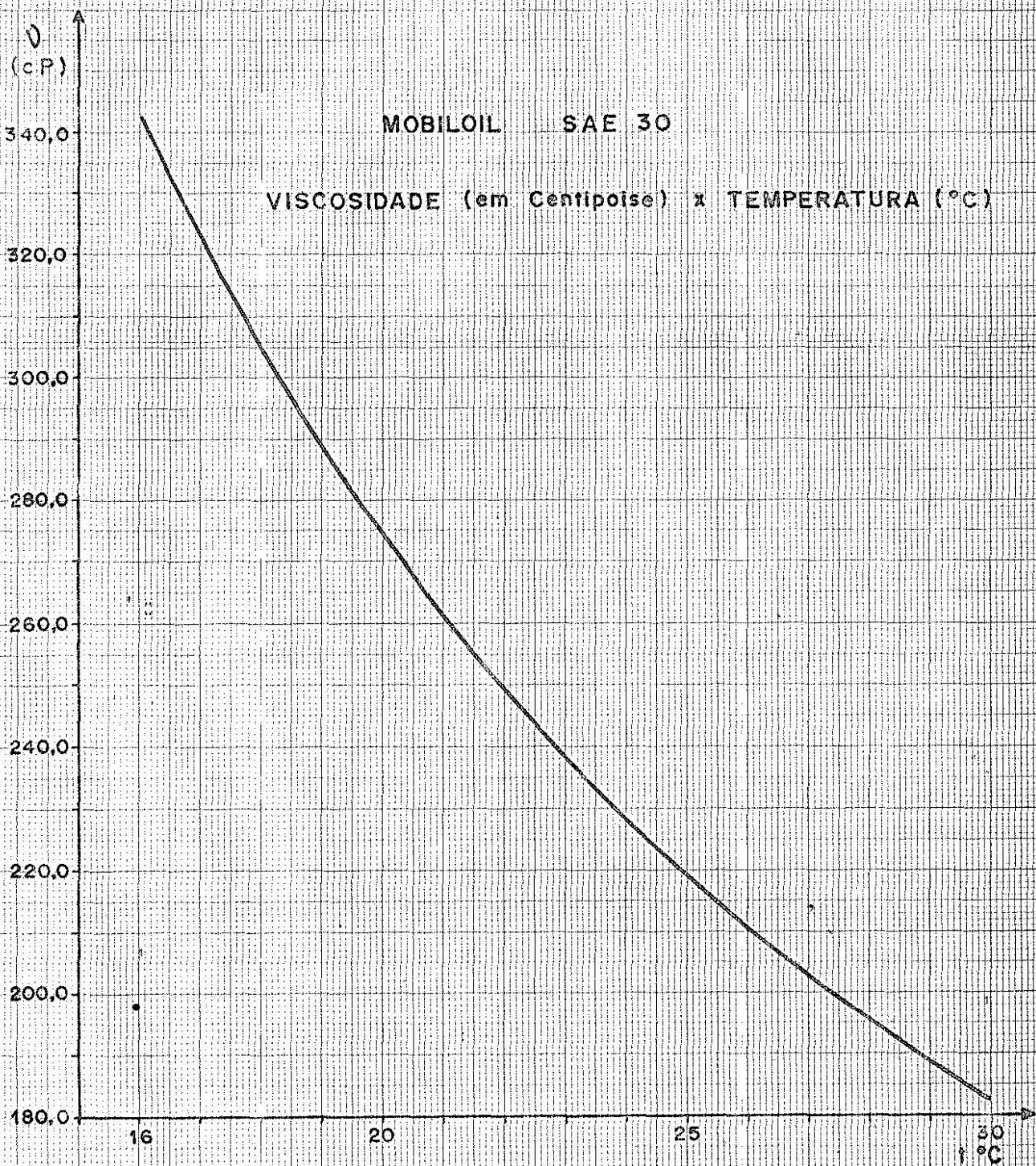


Gráfico nº 2

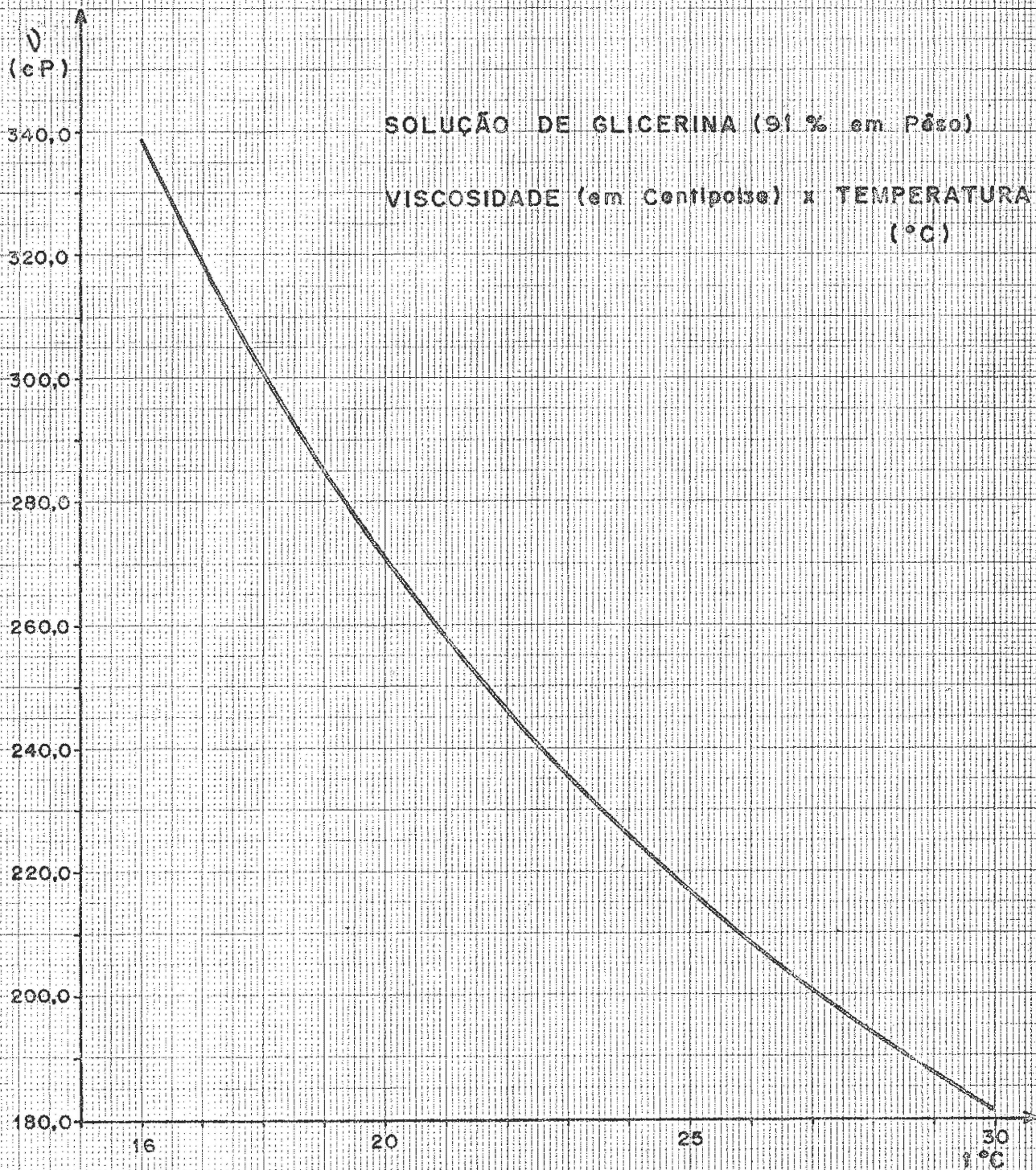


Gráfico nº 3

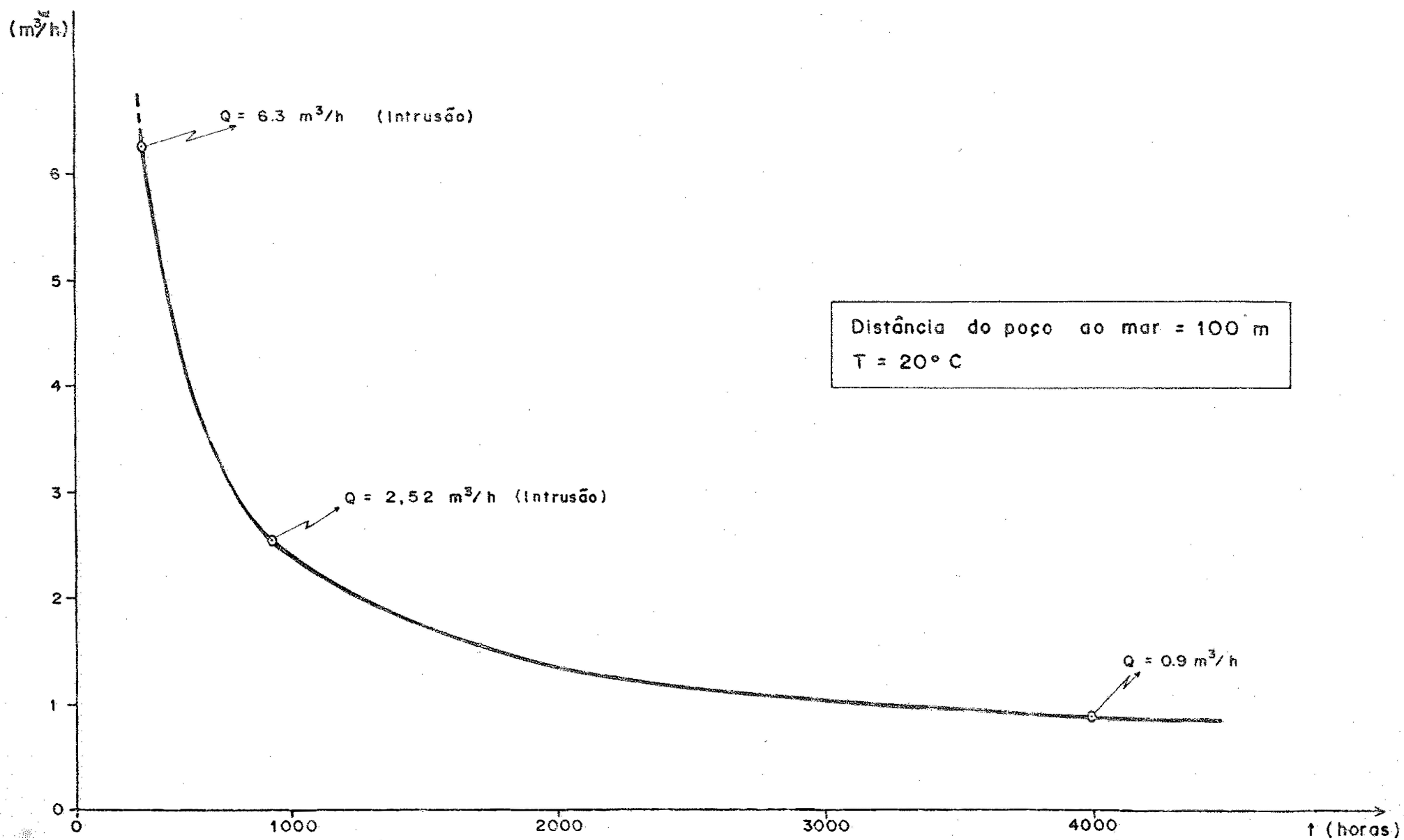


Gráfico nº 4 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE O TEMPO DE INTRUSÃO

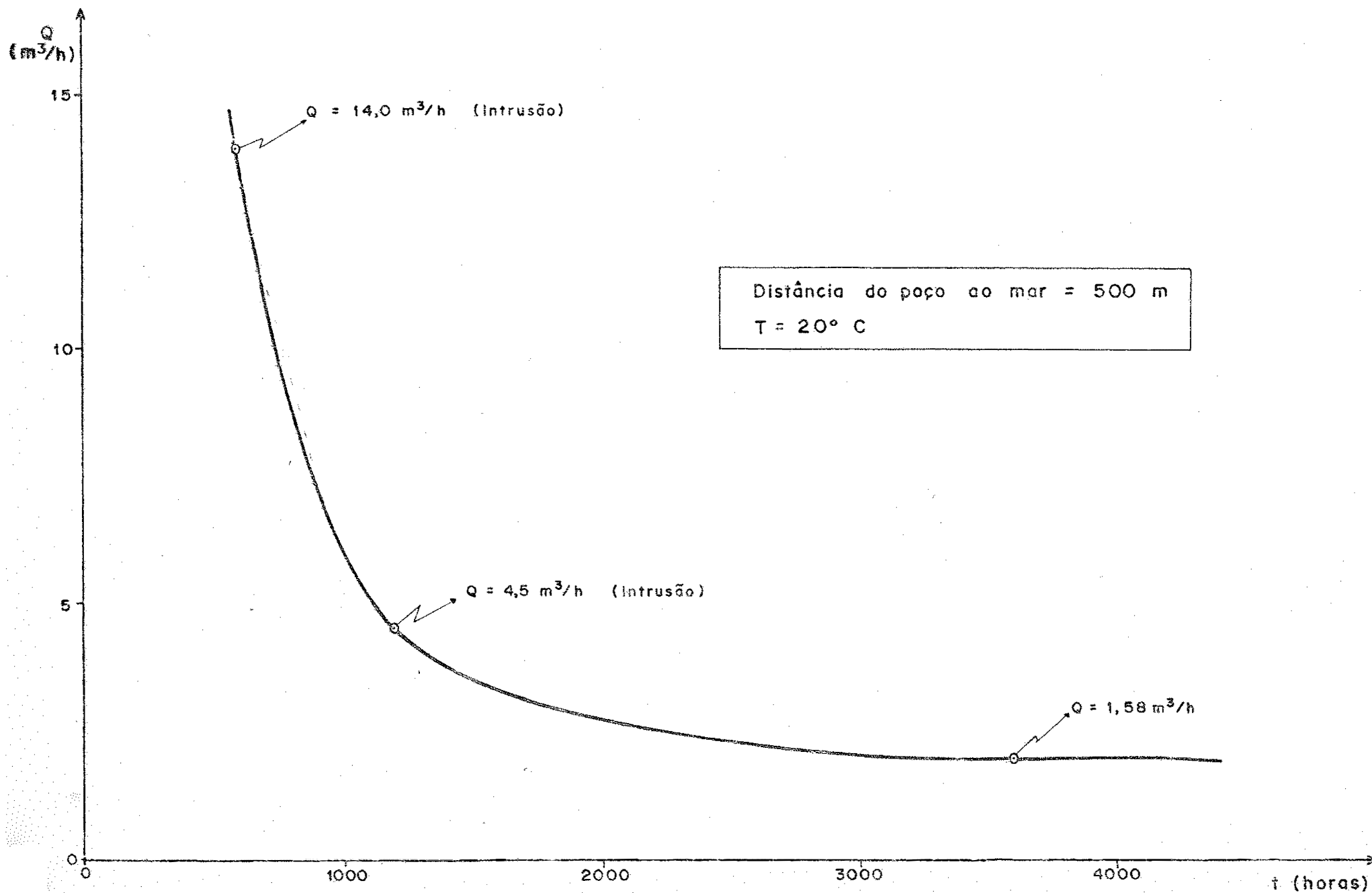


Gráfico nº 5 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO SOBRE O TEMPO DE INTRUSÃO

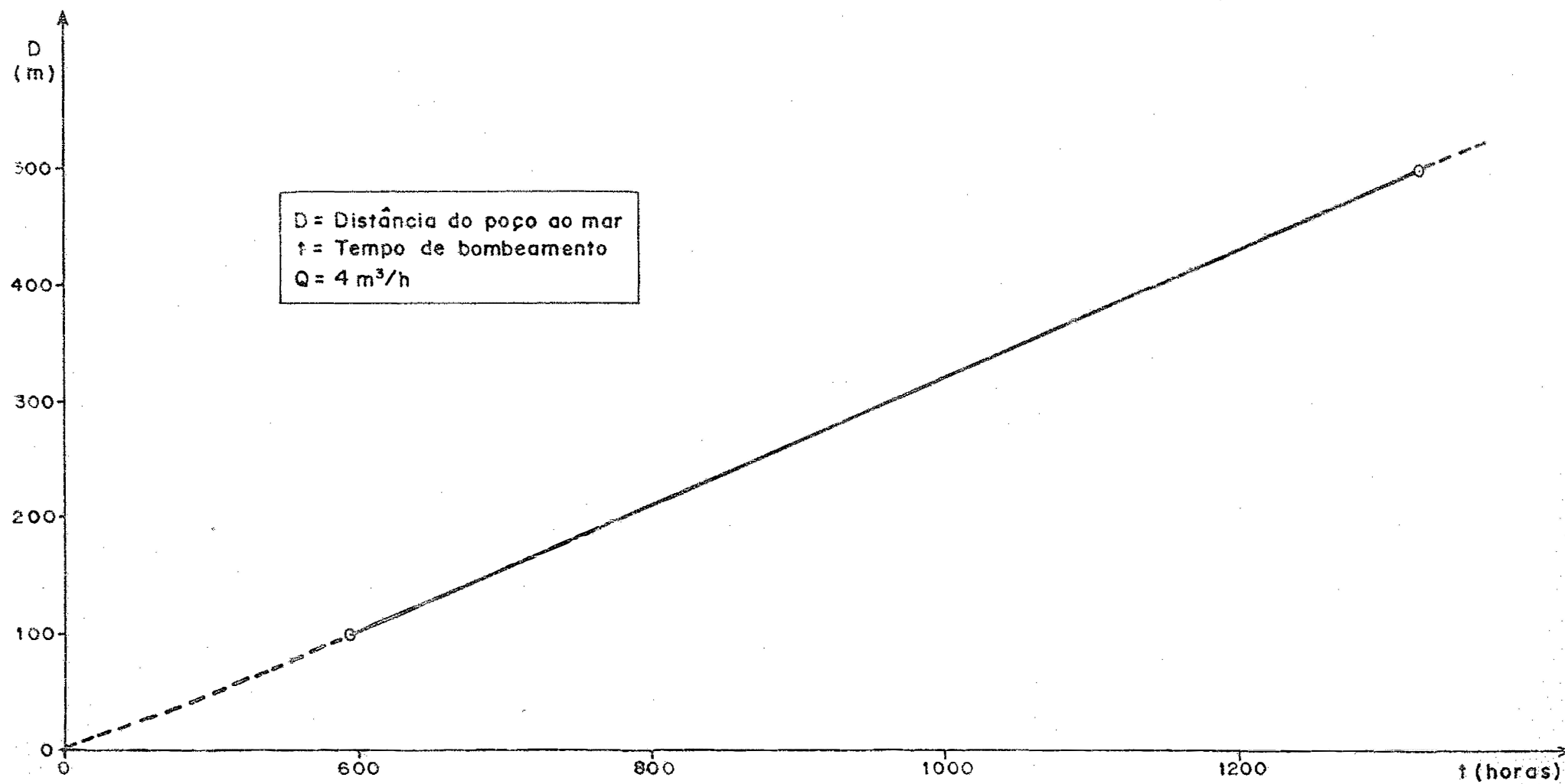


Gráfico nº 6 - INFLUENCIA DA DISTÂNCIA SOBRE O TEMPO DE INTRUSÃO

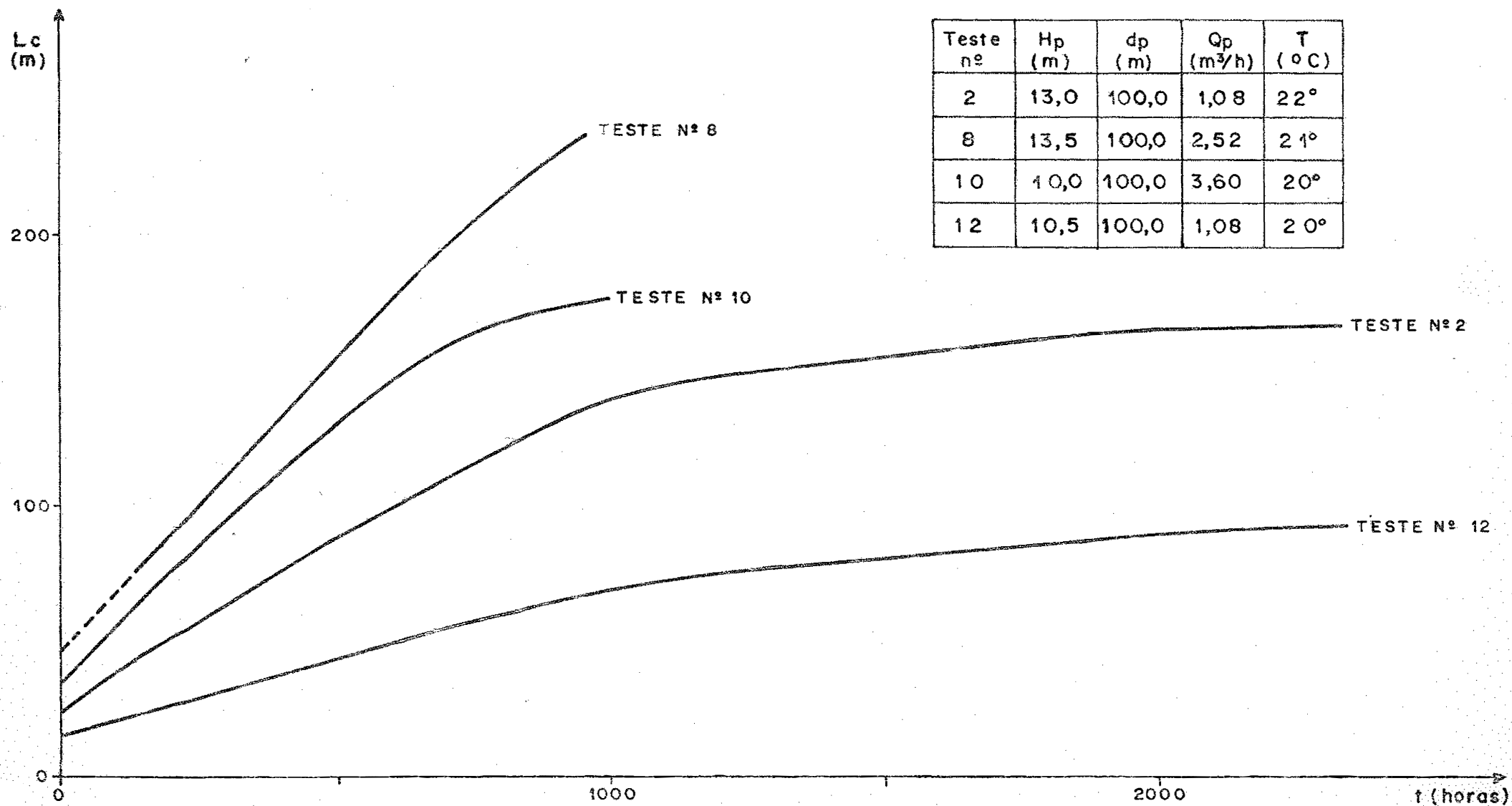


Gráfico nº 7 EVOLUÇÃO NO TEMPO DA CUNHA DE INTRUSÃO

MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 1

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 22,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 11,0 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	300	540	780	900		
Na ₁ (cm)	18,6	16,6	15,7	15,0	14,8		
Na ₂ (cm)	19,2	17,5	16,7	16,1	16,0		
P ₁ (cm)	0,7	2,0	4,6	6,3	6,6		
P ₂ (cm)	-	-	2,3	5,3	6,0		
L _c (cm)	0,9	9,8	14,0	17,0	21,0		
Q (cm ³ /s)	-	0,13	0,14	0,14	0,14		

PROTÓTIPO

t (h)	0	333	600	866	1000		
Na ₁ (m)	9,30	8,30	7,85	7,50	7,45		
Na ₂ (m)	9,60	8,75	8,35	8,05	8,00		
P ₁ (m)	0,35	1,00	2,30	3,15	3,30		
P ₂ (m)	-	-	1,15	2,65	3,00		
L _c (m)	9,0	98,0	140,0	170,0	210,0		
Q (m ³ /h)	0	2,34	2,52	2,52	2,52		

ESCALAS

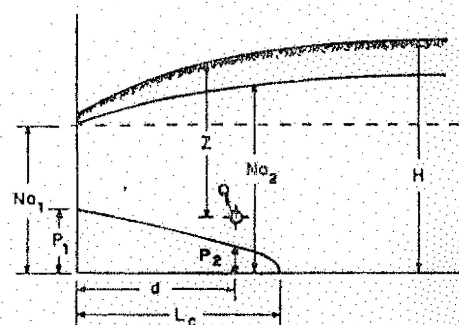
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,0025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 2

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 26,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 13,0 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	420	900	1740	2100		
Na ₁ (cm)	25,5	24,7	24,2	24,0	24,0		
Na ₂ (cm)	25,9	25,1	24,7	24,4	24,4		
P ₁ (cm)	0,9	1,3	2,0	2,3	2,3		
P ₂ (cm)	-	-	1,1	1,5	1,5		
L _c (cm)	2,2	9,7	14,0	16,5	16,5		
Q (cm ³ /s)	-	0,07	0,06	0,06	0,06		

PROTÓTIPO

t (h)	0	466	1000	1933	2333		
Na ₁ (m)	12,7	12,3	12,1	12,0	12,0		
Na ₂ (m)	12,9	12,5	12,3	12,2	12,2		
P ₁ (m)	0,45	0,65	1,0	1,15	1,15		
P ₂ (m)	-	-	0,55	0,75	0,75		
L _c (m)	22,0	97,0	140,0	165,0	165,0		
Q (m ³ /h)	0	1,26	1,08	1,08	1,08		

ESCALAS

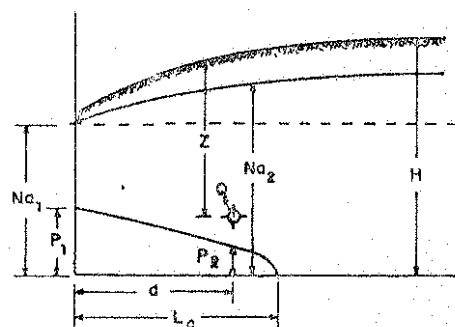
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 3

$$d_m = 50,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 500,0 \text{ m}$$

$$H_m = 28,5 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 14,2 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	360	540				
Na ₁ (cm)	26,4	22,6	20,6				
Na ₂ (cm)	28,4	21,9	19,6				
P ₁ (cm)	1,9	3,1	4,0				
P ₂ (cm)	-	-	5,5				
L _c (cm)	11,5	35,0	52,5				
Q (cm ³ /s)	-	0,8	0,8				

PROTÓTIPO

t (h)	0	400	600				
Na ₁ (m)	13,20	11,30	10,30				
Na ₂ (m)	14,20	10,95	9,80				
P ₁ (m)	0,95	1,55	2,00				
P ₂ (m)	-	-	2,75				
L _c (m)	115,0	350,0	525,0				
Q (m ³ /h)	-	14,4	14,4				

ESCALAS

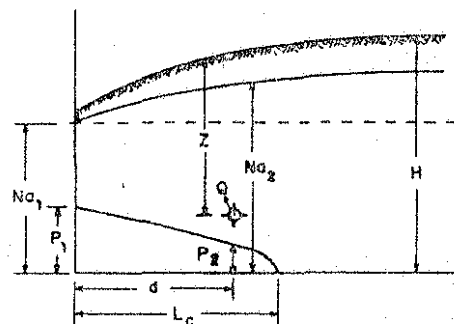
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 4

$$\begin{aligned} d_m &= 50,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 500,0 \text{ m} \\ H_m &= 29,5 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 14,75 \text{ m} \end{aligned}$$

MODELO

t (s)	0	1380	2280	2700	3240		
Na ₁ (cm)	27,4	25,8	25,2	25,0	24,5		
Na ₂ (cm)	29,2	27,5	26,9	26,7	26,2		
P ₁ (cm)	1,1	3,1	4,3	5,0	6,0		
P ₂ (cm)	-	-	-	0,4	1,6		
L _c (cm)	9,5	25,8	40,0	51,5	56,0		
Q (cm ³ /s)	-	0,11	0,11	0,11	0,11		

PROTÓTIPO

t (h)	0	1533	2533	3000	3600		
Na ₁ (m)	13,7	12,90	12,60	12,5	12,25		
Na ₂ (m)	14,6	13,75	13,45	13,35	13,10		
P ₁ (m)	0,55	1,55	2,15	2,50	3,00		
P ₂ (m)	-	-	-	0,20	0,80		
L _c (m)	95,0	258,0	400,0	515,0	560,0		
Q (m ³ /h)	-	1,98	1,98	1,98	1,98		

ESCALAS

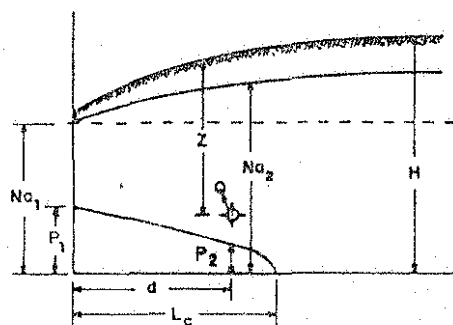
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 5

$$d_m = 50,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 500,0 \text{ m}$$

$$H_m = 29,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 14,50 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	300	1080				
Na ₁ (cm)	26,5	23,5	21,2				
Na ₂ (cm)	28,7	24,3	20,8				
P ₁ (cm)	1,0	3,0	3,8				
P ₂ (cm)	-	-	5,5				
L _c (cm)	9,0	22,0	54,0				
Q (cm ³ /s)	-	0,25	0,25				

PROTÓTIPO

t (h)	0	333	1200				
Na ₁ (m)	13,25	11,75	10,60				
Na ₂ (m)	14,35	12,15	10,40				
P ₁ (m)	0,5	1,50	1,90				
P ₂ (m)	-	-	2,75				
L _c (m)	90,0	22,00	540,0				
Q (m ³ /h)	-	4,50	4,50				

ESCALAS

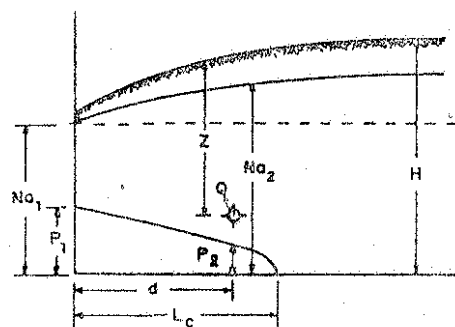
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 6

$$\begin{aligned} d_m &= 10,0 \text{ cm} & \longleftrightarrow & d_p = 100,0 \text{ m} \\ H_m &= 27,0 \text{ cm} & \longleftrightarrow & H_p = 13,50 \text{ m} \end{aligned}$$

MODELO

t (s)	0	360	1020	2700	3600		
Na ₁ (cm)	26,4	25,9	25,3	24,9	24,8		
Na ₂ (cm)	26,8	26,2	25,8	25,3	25,2		
P ₁ (cm)	0,8	1,3	1,9	2,8	3,2		
P ₂ (cm)	-	-	1,1	2,0	2,4		
L _c (cm)	3,5	8,8	13,5	21,0	24,2		
Q (cm ³ /s)	-	0,05	0,05	0,05	0,05		

PROTÓTIPO

t (h)	0	400	1133	3000	4000		
Na ₁ (m)	13,2	12,95	12,65	12,45	12,40		
Na ₂ (m)	13,4	13,10	12,90	12,65	12,60		
P ₁ (m)	0,4	0,65	0,95	1,40	1,60		
P ₂ (m)	-	-	0,55	1,00	1,20		
L _c (m)	35,0	88,0	135,0	210,0	242,0		
Q (m ³ /h)	-	0,90	0,90	0,90	0,90		

ESCALAS

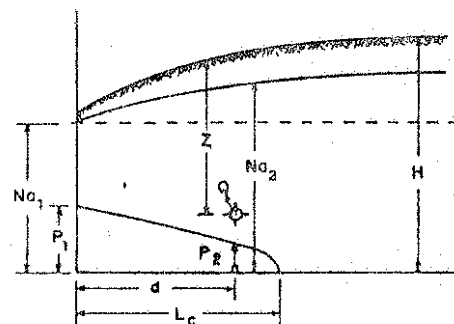
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 7

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 27,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 13,50 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	60	300	420			
Na ₁ (cm)	26,5	25,2	24,5	23,6			
Na ₂ (cm)	26,8	25,4	24,8	24,0			
P ₁ (cm)	-	1,2	1,6	2,6			
P ₂ (cm)	-	-	2,0	5,5			
L _c (cm)	-	6,0	13,1	16,3			
Q (cm ³ /s)	-	0,35	0,35	0,35			

PROTÓTIPO

t (h)	0	66	333	466			
Na ₁ (m)	13,25	12,60	12,25	11,80			
Na ₂ (m)	13,40	12,70	12,40	12,00			
P ₁ (m)	-	0,60	0,80	1,30			
P ₂ (m)	-	-	1,00	2,75			
L _c (m)	-	60,0	131,0	163,0			
Q (m ³ /h)	-	6,30	6,30	6,30			

ESCALAS

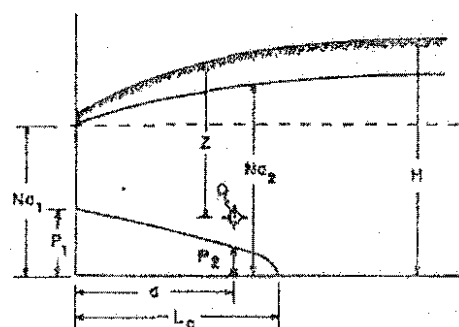
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 8

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 27,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 13,5 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	600	720	840			
Na ₁ (cm)	26,3	25,0	24,2	24,0			
Na ₂ (cm)	26,7	25,2	24,7	24,5			
P ₁ (cm)	-	2,9	3,8	4,3			
P ₂ (cm)	-	2,4	4,1	5,5			
L _c (cm)	-	19,0	21,0	23,8			
Q (cm ³ /s)	-	0,14	0,14	0,14			

PROTÓTIPO

t (h)	0	666	800	933			
Na ₁ (m)	13,15	12,50	12,10	12,0			
Na ₂ (m)	13,35	12,60	12,35	12,25			
P ₁ (m)	-	1,45	1,90	2,15			
P ₂ (m)	-	1,20	2,05	2,75			
L _c (m)	-	190,0	210,0	238,0			
Q (m ³ /h)	-	2,52	2,52	2,52			

ESCALAS

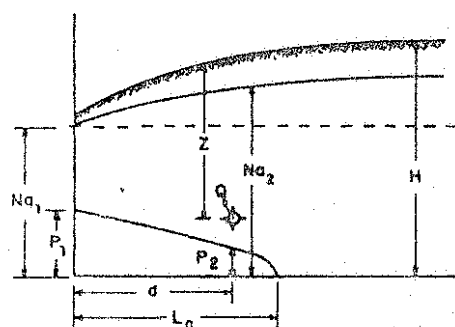
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 9

$$\begin{aligned} d_m &= 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m} \\ H_m &= 21,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 10,5 \text{ m} \end{aligned}$$

MODELO

t (s)	0	420	1200	1800	2700	4560	5400
Na ₁ (cm)	20,1	18,8	18,2	17,8	17,6	17,5	17,5
Na ₂ (cm)	20,7	19,6	19,0	18,7	18,5	18,4	18,4
P ₁ (cm)	1,4	1,8	3,1	4,1	4,9	5,9	6,0
P ₂ (cm)	-	-	1,2	2,1	3,0	4,0	4,2
L _c (cm)	6,0	7,9	13,0	16,2	21,0	24,3	24,7
Q (cm ³ /s)	0	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

PROTÓTIPO

t (h)	0	466	1333	2000	3000	5066	6000
Na ₁ (m)	10,05	9,40	9,10	8,90	8,80	8,75	8,75
Na ₂ (m)	10,35	9,80	9,50	9,35	9,25	9,20	9,20
P ₁ (m)	0,70	0,90	1,55	2,05	2,45	2,95	3,00
P ₂ (m)	-	-	0,60	1,05	1,50	2,0	2,10
L _c (m)	60,0	79,0	130,0	162,0	210,0	243,0	247,0
Q (m ³ /h)	-	1,08	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

ESCALAS

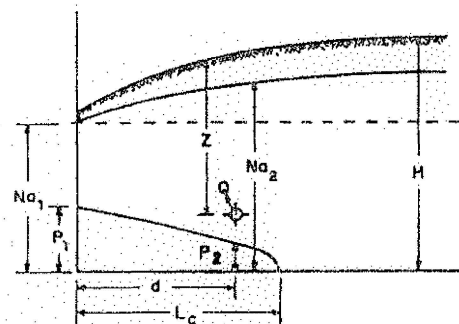
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 10

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 20,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 10,0 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	300	600	900			
Na ₁ (cm)	19,0	16,3	15,0	14,5			
Na ₂ (cm)	19,8	17,0	15,8	15,5			
P ₁ (cm)	0,9	2,1	4,4	6,5			
P ₂ (cm)	-	0,6	3,1	5,5			
L _c (cm)	3,5	10,7	15,5	17,5			
Q (cm ³ /s)	-	0,21	0,20	0,20			

PROTÓTIPO

t (h)	0	333	666	1000			
Na ₁ (m)	9,50	8,15	7,50	7,25			
Na ₂ (m)	9,90	8,50	7,90	7,75			
P ₁ (m)	0,45	1,05	2,20	3,25			
P ₂ (m)	-	0,30	1,55	2,75			
L _c (m)	35,0	107,0	115,0	175,0			
Q (m ³ /h)	-	3,78	3,60	3,60			

ESCALAS

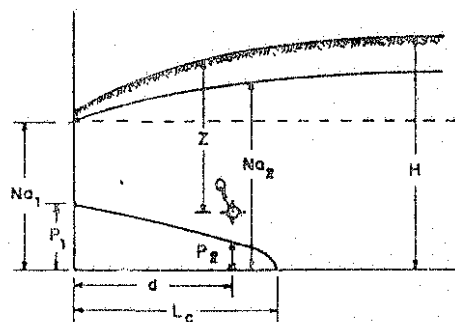
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 11

$$\begin{array}{lcl} d_m = 10,0 \text{ cm} & \longleftrightarrow & d_p = 100,0 \text{ m} \\ H_m = 21,0 \text{ cm} & \longleftrightarrow & H_p = 10,5 \text{ m} \end{array}$$

MODELO

t (s)	0	300	1080	1440	1920		
Na ₁ (cm)	20,0	18,3	17,1	16,9	16,7		
Na ₂ (cm)	20,6	18,9	17,8	17,6	17,5		
P ₁ (cm)	0,9	1,6	3,5	4,5	5,8		
P ₂ (cm)	-	-	2,2	3,3	5,5		
L _c (cm)	4,9	8,7	15,5	19,5	24,8		
Q (cm ³ /s)	-	0,13	0,14	0,11	0,11		

PROTÓTIPO

t (h)	0	333	1200	1600	2133		
Na ₁ (m)	10,0	9,45	8,55	8,45	8,35		
Na ₂ (m)	10,30	9,45	8,90	8,80	8,75		
P ₁ (m)	0,45	0,80	1,75	2,25	2,90		
P ₂ (m)	-	-	1,10	1,65	2,75		
L _c (m)	49,0	97,0	155,0	195,0	248,0		
Q (m ³ /h)	-	2,34	1,98	1,98	1,98		

ESCALAS

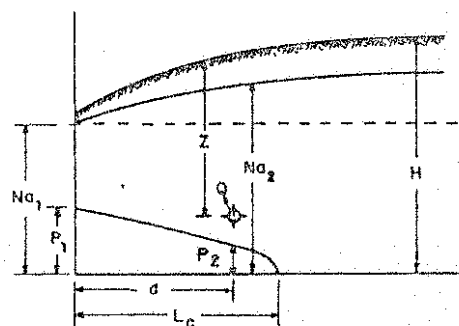
$$\bar{X}_r = 1:1000$$

$$\bar{Z}_r = 1.50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0.0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



MODELO HELE-SHAW VERTICAL

TESTE Nº 12

$$d_m = 10,0 \text{ cm} \longleftrightarrow d_p = 100,0 \text{ m}$$

$$H_m = 21,0 \text{ cm} \longleftrightarrow H_p = 10,5 \text{ m}$$

MODELO

t (s)	0	1080	1500	2100			
Na ₁ (cm)	19,6	19,0	19,0	19,0			
Na ₂ (cm)	20,2	19,7	19,7	19,7			
P ₁ (cm)	0,6	1,5	1,7	1,8			
P ₂ (cm)	-	-	-	-			
L _c (cm)	1,5	7,5	8,5	9,3			
Q (cm ³ /s)	-	0,06	0,06	0,06			

PROTÓTIPO

t (h)	00	1200	1666	2333			
Na ₁ (m)	9,8	9,50	9,50	9,50			
Na ₂ (m)	10,1	9,85	9,85	9,85			
P ₁ (m)	0,30	0,75	0,85	0,90			
P ₂ (m)	-	-	-	-			
L _c (m)	15,0	75,0	85,0	93,0			
Q (m ³ /h)	-	1,08	1,08	1,08			

ESCALAS

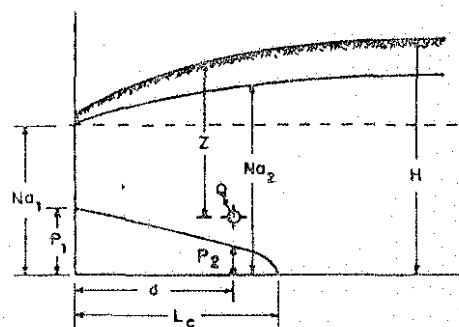
$$\bar{x}_r = 1:1000$$

$$\bar{z}_r = 1:50$$

$$Q_p = \frac{Q_m}{0,0002}$$

$$t_p = \frac{t_m}{0,00025}$$

LEGENDA



SIMBOLOGIA

h_d	- nível piezométrico da água doce sobre o nível do mar
h_s	- nível da água salgada sobre o nível do mar
h_p	- potencial puntual
K	- permeabilidade
Q	- vazão
Z ou α	- profundidade do interface abaixo do nível do mar
b	- espessura saturada abaixo do nível do mar de um aquífero livre
γ_f ou γ_d	- peso específico da água doce
γ_s	- peso específico da água salgada
γ_p	- peso específico da água puntual
γ_a	- peso específico médio em uma vertical
L	- comprimento ou nível de água ambiental
h_a	- potencial ou nível de água ambiental
b_m	- espaçamento entre as placas de um modelo Hele-Shaw
K_m	- condutividade hidráulica do modelo
μ	- viscosidade absoluta <i>absoluta</i>
ν	- viscosidade cinemática
x, y, z	- coordenadas cartesianas
subíndice m = modelo	
subíndice p = protótipo	

- α_r - constante
- δ - relação de diferença entre o peso específico das águas salgada e doce pelo peso específico da água doce.
- S_o - coeficiente de armazenamento específico definido como o volume de água liberada pelo armazenamento em um volume unitário do aquífero por unidade de altura; dimensão L.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

1. BEAR, Jacob. 1967. "Dynamics of fluids in porous media" pp. 557-573 e 687-701.
2. BEAR, Jacob. 1960. Scales of viscous analogy models for ground water studies. Journal of the Hydraulics Division. New York, 86(2): 11-23, Feb.
3. BENITEZ, A. "Captacion de águas subterrâneas" Editorial Dossat, S.A. Madrid, pp. 153-192, 1972.
4. COLUMBUS, Nathan. 1965. Viscous model study of sea water intrusion in water table aquifers. Water Resources Research, Washington, 1 (2): 313-23.
5. CUSTODIO, Emilio & LLAMAS, Manuel Ramón, ed. 1976. Hidrologia Subterrânea. Barcelona, Omega, V.2.
6. SANTING, G. Modèle pour l'étude des problèmes de l'écoulement simultané des eaux souterraines douces et salées. IASH, vol. 2, pp. 184-193, Assemblée générale de Bruxelles, 1971.
7. Handbook of Chemistry and Physics". 30th ed. p. 1742.
8. MESQUITA, F.M. 1973. Contribuição a Utilização de Modelo Analógico Hele-Shaw vertical para estudos de Drenagem. Trabalho de Dissertação apresentado na Universidade de São Carlos, SP.